



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANÁLISIS DE LA AMENAZA DE INUNDACIÓN FUTURA EN LOS CORRALES DE BUELNA

Trabajo realizado por:
Abraham Mallo Miranda

Dirigido:
Manuel del Jesús Peñil
Jesús Casado Rodríguez

Titulación:
Grado en Ingeniería Civil

Santander, Julio de 2020

TRABAJO FIN DE GRADO

Resumen

Título: Análisis de la amenaza de inundación futura en Los Corrales de Buelna
Autor: Abraham Mallo Miranda
Director: Manuel del Jesús Peñil
Convocatoria: Julio 2020
Palabras clave: Los Corrales de Buelna, inundación, cambio climático, serie sintética de precipitación, modelo hidrológico

El cambio climático preocupa cada día más y más a los habitantes de nuestro planeta. Llevamos ya unos años observando como la problemática generada por este fenómeno complica la vida de personas en prácticamente todos los puntos del globo. La subida del nivel del mar provoca inundaciones más peligrosas en la costa este de los Estados Unidos, a la par que año tras año se producen huracanes cada vez más violentos. Europa continental vive cada verano un calor sofocante, más propio de zonas tropicales que del viejo continente; y las plagas y enfermedades se expanden a lugares que hace años no lo hacían.

Este problema ha llegado finalmente a la agenda política de los principales encuentros mundiales. Los acuerdos climáticos celebrados en las conferencias sobre el cambio climático se suceden, tratando de poner fin a un problema que lejos de decelerarse; se acumula poco a poco haciendo su solución cada vez más difícil. Lamentablemente, la geopolítica dicta las normas del juego, y dichos acuerdos son ignorados generalmente, ya que en el fondo no fuerzan a nadie a seguir una agenda de mejora de la política climática de los estados.

En Europa se ha hecho un esfuerzo bastante importante por conseguir alcanzar ciertos objetivos de emisiones para 2040-2050, según lo firmado en los acuerdos de París. La juventud se ve cada día más preocupada por los futuros efectos de la crisis climática, mientras que poco a poco parece que las instituciones responden a esta llamada a la cordura climática.

España se muestra particularmente vulnerable al cambio climático; ya que generalmente el sur de Europa presenta una exposición mayor a alteraciones de temperaturas y precipitación. El área mediterránea está enfrentada a problemas de sequía en las próximas décadas, con un riesgo enorme de desertificación. Los efectos no se limitan a molestias derivadas de las altas temperaturas; si no que son potencialmente graves: Podemos esperar problemas de salud en la población, perdidas sin igual en diversidad ecológica, pérdidas económicas en el sector agroalimentario, en el sector energético y, como fin último de este estudio; daños materiales multimillonarios, heridos y muertos en eventos extremos derivados del problema del clima.

El Besaya es un pequeño río de la cuenca del cantábrico que nace en la comarca de Campoo-Los Valles, al sur de la comunidad de Cantabria. Su cuenca, con una superficie del orden de 465 kilómetros cuadrados y una longitud de cauce de unos

80 kilómetros; abarca los paisajes de los valles de Buelna e Iguña para finalmente nutrir de caudal al río Saja.

Los sucesos de inundación fluviales han sido una problemática ya histórica en este río, no solo a su paso por Los Corrales de Buelna; si no también en Torrelavega e incluso sus afluentes han causado daños pasados en pueblos de la zona. En los últimos años, las inundaciones en Cantabria han cogido fuerza. Cortes en carreteras y vías ferroviarias, pérdidas agrícolas y accidentes derivados de este fenómeno son una realidad que previsiblemente va en aumento.

Como se recoge en este estudio, los eventos de precipitación tienen una proyección a reducir su frecuencia a la vez que aumentan su intensidad. El cóctel de estos factores supone un aumento de la torrencialidad que, en otro estudio realizado posteriormente nos ofrece una visión de las zonas inundables en la localidad cántabra de Los Corrales de Buelna.

Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron las herramientas digitales ArcGIS y HEC-HMS para construir un modelo hidrológico de la cuenca del río Besaya. Dicho modelo fue calibrado a partir de observaciones de caudal históricas recogidas de la base de datos del CEDEX. Para modelar la climatología histórica se recurrió a las series de precipitación y temperatura de la AEMET.

Con el modelo construido y calibrado, se procedió a analizar las previsiones de cambio climático para la zona de Buelna. Puesto que los datos de partida eran de una longitud temporal no demasiado extensa, se previeron problemas a la hora de hacer un análisis de los eventos extremos del caudal del río. Por ello, se recurrió a una metodología alternativa que consiste en la generación de una serie de precipitación sintética a partir de parámetros estadísticos frutos del análisis de las series históricas y de las proyecciones climáticas de la base CORDEX.

Los resultados de este estudio y de su sucesor muestran que, si bien los caudales medios del río descienden (concretamente pasan de ser $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ a ser próximos a $10 \text{ m}^3/\text{s}$, del orden de un 20% inferiores), la virulencia en los eventos extremos de estos aumenta con respecto a los valores que se tenían en cuenta hasta ahora.

Es de esperar que la reevaluación de vulnerabilidad de las zonas fluviales haya de ser ejecutada en los próximos años, según contemplan ya las autoridades en este aspecto. La creación por primera vez de un ministerio de transición ecológica indica que institucionalmente se comienza a acelerar el proceso de evaluación de estos riesgos, a la vez que la cadena de administraciones públicas mejora las condiciones de limpieza de los cauces fluviales, revisa las infraestructuras críticas y reescribe sus protocolos de actuación de emergencia.

Abstract

Title: Analysis of the future flooding threat in Los Corrales de Buelna
Author: Abraham Mallo Miranda
Director: Manuel del Jesus Peñil
Call: July 2020
Key Words: Los Corrales de Buelna, flooding, climate change, synthetic series of precipitation

Each day, climate changes worries more and more the inhabitants of our planet. We have been observing for some years now how the generated problems by this phenomenon makes the life of people hard almost everywhere around the globe. The sea level rise is provoking flooding of increased dangerousness in the east coast of the United States, while at the same time each year the produced hurricanes rise in its violence. Continental Europe lives each summer a suffocating heat, more prone to happen in tropical areas than in the old continent; and plagues and diseases are expanding to regions where they did not years ago.

This problem has finally reached the public agenda of the main global meetings. The climatic agreements reached in climate change conferences are produced one after the other, trying to put end to a problem that, far from decelerating; is getting accumulated slowly but consistently making its solution more difficult as time goes on. Unfortunately, geopolitics dictate the rules of the game, and those agreements are commonly ignored, as in the end; they do not force any of the members to follow an agenda of improvement in the climate policy of states.

In Europe, there has been a decent effort aiming at reaching some emission objectives by 2040-2050; following the compromises signed in the latest Paris agreements. Youth seems also more aware of the future effects of this climatic crisis, while public institutions seem to start to respond, still slowly, to this call to climatic sanity.

Spain is particularly vulnerable to climate change, as generally the south of Europe presents a higher exposition to alterations both in temperature levels and precipitation. The Mediterranean area is facing problems of drought for the following decades to come, with a substantial risk of desertification. The effects are not limited to discomfort due to the rising temperatures, as we they can turn potentially into grave problems: We can expect health problems in the population, losses in ecologic diversity not seen to this date, economic losses in the primary sector, in the energy sector and, as the aim of this study; material damage with losses in the multimillion order, injured people and fatalities under extreme events due to climate problematic.

River Besaya is a small river in the Cantabric basin, born in the county of Campoo-Los Valles, located in the south of the community of Cantabria. Its basin, with an extension in the order of 465 squared kilometers, and a length of its main channel close to 80 kilometers; flows through the landscapes of Buelna and Iguña Valleys, and finally dies flowing into Besaya river.

Problems related to river flooding have been common events historically happening to this river, not only while flowing through Los Corrales de Buelna, but also through Torrelavega and even some of its tributary rivers have caused damage on some towns in the area. In the last few years, flooding in Cantabria seems to have risen in strength. Road and rail cuts, losses in agriculture fields and accidents derived from this phenomenon are a reality that, most likely will keep rising.

As this study checks, precipitation events have likelihood to reduce their frequency while their intensity goes up. The result of the alteration of this factors implies an increasement in torrentiality that, in a secondary study carried out will offer a perspective of the flooding maps in the Cantabric municipality of Los Corrales de Buelna.

In order to carry out this study, digital tools consisting on ArcGIS and HEC-HMs were use to build up a hydrologic model of river Besaya's basin. This model was calibrated with the flow observations retrieved from CEDEX database. In order to model the existing historic climatology, the source was found on precipitation and temperature series from AEMET.

With the model built and calibrated, we proceeded to analyze the previsions of climate change in Buelna valley. As the original data had a brief temporal scale, we foresaw problems regarding the execution of extreme analysis of river flow. Due to this, an alternative methodology was used, consisting on the generation of synthetic precipitation series from the statistical parameters found in the analysis of both historic data and climate change predictions made by CORDEX institution.

The result of this study and its successor shows that, while the average flow of the river will decrease (specifically, the result show a reduction from $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ to a number close to $10 \text{ m}^3/\text{s}$, or an estimated 20% decreasement), the virulence of extreme events will augment when compared to the values we had been using so far.

It is expected a reevaluation of exposition on areas close to rivers to be carried out in the following years, as it has been already considered by public authorities in this field. The creating of a new ministry of ecologic transitions seems to show that institutions will begin to accelerate the process of evaluation of this risks, while the chain of public administration improves the situation of the river channels, revises the critical infrastructure and rebuilds its emergency protocols.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a Manuel del Jesús por introducirme hace unos años al bonito mundo de la hidrología.

María, gracias a ti también.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	10
2.1. Características del río	10
2.2. Principales afluentes	10
2.3. Administración	10
2.4. Perfil longitudinal del río.....	11
2.5 Agua Embalsada	11
3. DATOS DE PARTIDA	12
3.1. Cartografía utilizada.....	12
3.2. Usos de suelo	12
3.3. Propiedades físicas del suelo	12
3.4. Datos de precipitación.....	13
3.5. Datos de temperatura	14
3.6. Series foronómicas.....	15
3.7. Cambio climático:	16
4. SOFTWARE UTILIZADO.....	19
4.1. Software Python.....	19
4.2. HEC-HMS.....	20
4.3. ArcGIS.....	20
5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCEDIMIENTO.....	21
6. MODELADO EN HEC-HMS.....	22
6.1. Construcción del modelo de HMS usando la herramienta GEO-HMS para ARCGIS	22
6.2. Pretratamiento de los datos iniciales:	24
6.3. Selección de los métodos del modelo	29
6.3.1. Métodos elegidos referentes a las subcuencas:.....	29
6.3.2. Método elegido referente a los tramos del río.....	31
6.3.3. Modelo meteorológico:	31
6.4. Establecimiento inicial de los parámetros.....	32
6.4.1. Usos de suelo:	33
6.4.2. Propiedades del suelo.....	34
6.4.3. Tiempo de concentración.....	38
6.4.4. Parámetros elegidos en base a recomendaciones:.....	39
6.5. Calibración del modelo.....	39

6.5.1. Calibración manual.....	41
6.5.2. Calibración automática	42
6.6. Resultados de la calibración y validación	45
6.6.1. Parámetros calibrados:.....	45
6.6.2. Evaluación y validación	46
7. CAMBIO CLIMÁTICO	50
7.1. Parametrización estadística de la precipitación.....	50
7.1.1. Obtención de los parámetros estadísticos en la serie histórica	52
7.1.2. Adaptación de los parámetros al cambio climático	55
7.2. Generación sintética de la serie de precipitación futura.....	60
7.2.1. Código sintetizador.....	61
7.2.2. Resultado de la serie sintética.....	62
7.3. Tratamiento de la temperatura.....	63
7.3.1. Parametrización de la temperatura en la serie antigua	63
7.3.2. Adaptación de la temperatura según el escenario RCP 8.5.....	64
8. RESULTADO	67
Bibliografía	70
A- PROCESO DE CALIBRACIÓN	72
B- Mapa de uso de suelos CORINE LAND COVER	79

1. INTRODUCCIÓN

La relación del hombre con la naturaleza no siempre ha sido fácil. La brutalidad del mundo natural ha sido causante de multitud de tragedias en la historia, causando hambrunas, incendios u olas de frío polar. Hoy en día hemos medio aprendido a dominar esa faceta cruel de la tierra basándonos en una tecnología, conocimientos y riqueza que nos permite noquear estos impactos.

A un mismo tiempo, el desarrollo del hombre ha producido un desequilibrio en la dinámica planetaria de gases de diverso tipo. Antaño, en la era preindustrial (anterior al siglo XVIII), la concentración atmosférica de dióxido de carbono se situaba en torno a las 200 partes por millón (ppm). Hoy en día, hemos superado la barrera de las 400 partes por millón. Si bien no es verificable que el total de ese incremento sea por causas antrópicas, teniendo en cuenta la velocidad a la que se ha producido ese cambio, el consenso en el seno de la comunidad científica es el de asumir que la acción del hombre sobre el planeta ha causado este incremento.

El hombre lleva estos siglos haciendo una labor faraónica en cuanto a la extracción de combustibles fósiles (carbono en última instancia) de las profundidades de la tierra, donde no tiene interacción con la atmósfera (al menos a una escala humana, ya que los intercambios de masa entre el subsuelo-suelo-atmósfera son lentos). La combustión de estos combustibles supone un conducto directo del carbono atrapado en las profundidades hacia la atmósfera. En conjunto, en un plazo de tiempo lo suficientemente largo este carbono será reabsorbido eventualmente por los océanos, los suelos y las rocas y, sobre todo, por la vegetación a través de la fotosíntesis (hasta que se logre una estabilidad entre las proporciones de carbono de cada capa, tal y como sucedía en el tiempo preindustrial). Desgraciadamente, los ritmos de transporte de carbono entre estas capas no son lo suficientemente rápidos como para que la quema de estos combustibles no sea un problema.

La motivación del hombre no ha sido, en principio, la de dañar la estabilidad climática del planeta, sino que existe una necesidad imperiosa por parte de nuestra especie de progresar socioeconómicamente, para lograr una vida más plena y cómoda. Este desarrollo, que se ha llevado a cabo durante toda la historia, se acentúa significativamente con la llegada de la revolución industrial. La máquina de vapor, capaz de realizar un trabajo mucho mayor que la fuerza animal y humana; permite transformar una materia rica energéticamente, pero que antes tenía poco valor (carbón) en trabajo mecánico importante para prácticamente todos los procesos industriales. Adicionalmente, el ritmo de crecimiento poblacional se elevó notablemente gracias a esa innovación tecnológica, y a otras que mejoran la salud pública, aumentan la esperanza de vida y reducen la mortalidad infantil.

Las consecuencias de este incremento atmosférico de las concentraciones no solo de dióxido de carbono, sino también de otros gases de efecto invernadero como el vapor de agua (que además está relacionado con la temperatura global, y es el principal causante del efecto invernadero) o el metano, suponen una alteración

climática a escala global. Esta alteración es además acumulativa, por lo que los efectos de la emisión de estos gases se observan a largo plazo.

En este estudio se realizará un análisis a nivel regional de las consecuencias que este cambio climático inflige sobre el régimen de caudales del río Besaya. El objetivo será el análisis a medio plazo (2060-2080) donde disfrutamos de una certeza de los valores de cambio climático aceptable; a la vez que está lo suficientemente alejada del presente para poder extraer conclusiones de los efectos acumulativos del calentamiento.

Las consecuencias para un río de estas características son de todo tipo. Por un lado, el medio natural se puede ver afectado por caudales reducidos, temperaturas mayores en el agua, disminución del oxígeno disuelto disponible, incorporación de especies invasoras acostumbradas a climas más cálidos u otros impactos que si bien son muy interesantes, se escapan de los límites de este proyecto.

El medio social, que engloba a la población, la cultura, la economía y el patrimonio histórico; es también objeto de ataque por parte del cambio climático en cuanto al régimen de caudales del río. Por un lado, la salud de la población está en riesgo ante sucesos de inundación, si son particularmente violentos llegando a generar incluso pérdida de vidas humanas. Las afecciones económicas pueden venir por multitud de lados, con daños materiales por inundaciones, pérdidas de suelo fértil, sequías que afecten al sector agroalimentario, o incluso pérdidas económicas en la producción de energía, ya sea por tener menos caudal turbinable en centrales hidroeléctricas o porque la temperatura del agua impida efectuar la refrigeración de centrales térmicas (por motivos ambientales).

Como se ha comentado, el objetivo único en este estudio es el análisis de los caudales del río a su paso por el municipio de Los Corrales de Buelna. Para ello, se efectúa un proceso en el que se modela la cuenca mediante un programa informático. Dicha cuenca virtual será calibrada utilizando los datos históricos de precipitación, temperatura y caudales. La calibración debe resultar en una simulación de la serie histórica de caudales, de tal modo que no tengamos dudas de credibilidad de caudales simulados a partir de datos no históricos. Para hacer un análisis de cambio climático, se estudiará la variación de los parámetros climáticos clave con respecto a los datos pasados de los que partimos. Esto nos permitirá elaborar una serie sintética de precipitaciones, que sea lo suficientemente larga como para representar fidedignamente tanto las precipitaciones comunes del día a día, como los eventos más copiosos. Esta serie artificial sintética nos permitirá obtener una serie de caudales (también sintética) realista con respecto a los eventos extremos, de la cual podremos extraer una serie de conclusiones con respecto a la amenaza de inundación.

En un estudio llevado a cabo a continuación, pero temáticamente diferente de este, se utilizarán esta serie de caudales para efectuar un análisis del riesgo de inundación en Los Corrales de Buelna y sus alrededores, que responde a una necesidad real de la población de estar preparada correctamente ante episodios extremos en el río Besaya (Miranda, 2020).

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Es importante contar con un contexto previo en la zona sobre la que se va a desarrollar el estudio. Contar con información básica nos ayudará a la hora de comprender los resultados que estamos obteniendo, a la vez que puede ser de gran ayuda a la hora de localizar algún tipo de error. Para ello, se procede a efectuar un breve análisis de la cuenca sobre la que trabajamos:

2.1. Características del río

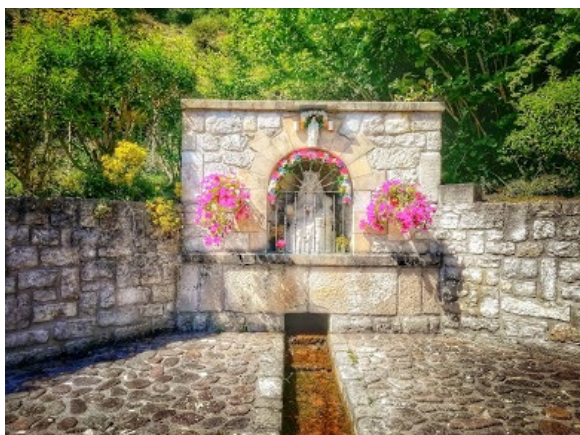


Figura 1. Nacimiento del Besaya (de acceso público)

El río nace entre los municipios de Aradillos y Cañeda, en la comarca de Campoo de Enmedio. Recorre unos 36,5 kilómetros hasta llegar al municipio de Los Corrales de Buelna, y en unos 15 kilómetros más llega a Torrelavega, donde muere al aportar sus aguas al río Saja. Por lo tanto, pese que hablamos de cuenca del Besaya, está englobada en la cuenca Saja-Besaya. A lo largo de su recorrido, fluye por los valles de Iguña y del Buelna.

Tiene un caudal medio que oscila entre los 12-13 m³/s.

2.2. Principales afluentes

Los afluentes del río (ver figura 2) (CHC. Confederación hidrográfica del Cantabrico, s.f.) son:

- Río Torina. Es el principal, con casi 7 kilómetros de longitud.
- Río Erecia, 11,5 kilómetros de cauce
- Río Los Llares, 11,9 kilómetros
- Río Cieza, 8,4 kilómetros

2.3. Administración

El Besaya es un cauce fluvial ubicado íntegramente en la comunidad autónoma de Cantabria, y también sus. Como la mayoría de los ríos de la zona norte del país, su relativamente corta longitud y pequeña cuenca han causado que el organismo que lo representa

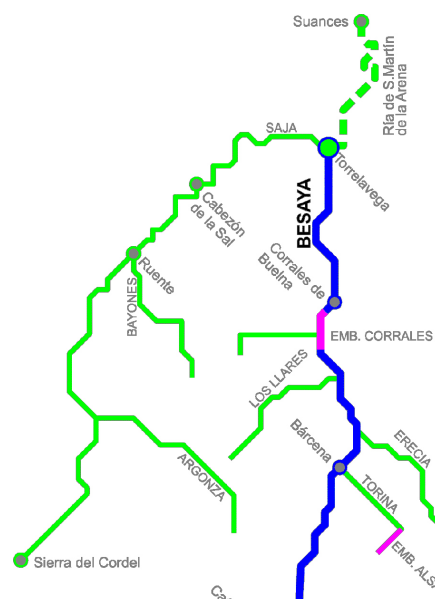
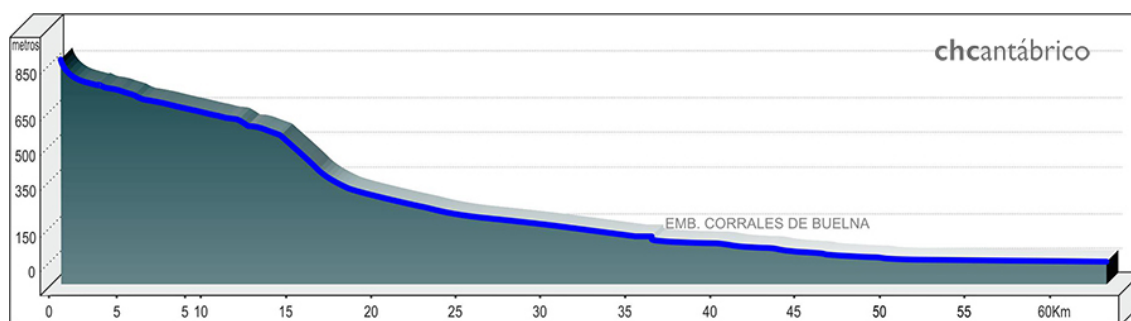


Figura 2. Esquema del río, sus afluentes y su contribución al río Saja

administrativamente también englobe a otros ríos de la zona norte del país en la demarcación hidrográfica del Cantábrico (según la directiva Marco del Agua). Esta surge de la separación de antigua demarcación hidrográfica del norte en dos (según el Real Decreto 266/2008), una para el río Miño-Sil, y la demarcación hidrográfica del Cantábrico (Cedex, s.f.).

2.4. Perfil longitudinal del río

El río nace a unos 850 metros de altitud, y en su desembocadura en Torrelavega tiene una elevación de 25 metros, resultando en un desnivel de 825 metros. En el perfil longitudinal se observa un obstáculo denominado embalse de Los Corrales de Buelna (gráfica 1), que es una captación de agua para la población de Los Corrales de Buelna. Realmente está inmediatamente río abajo del municipio de Arenas de Iguña.



Gráfica 1. Perfil longitudinal del río Besaya (Confederación hidrográfica del Cantábrico)

2.5 Agua Embalsada

Aparte de las captaciones, la cuenca del Besaya cuenta con dos embalses que es importante conocer:

- Embalse de Alsa: Represa las aguas del río Torina, está ubicado en San Miguel de Aguayo y tiene 23 hectómetros cúbicos de capacidad. Pertenece a Viesgo Alimenta a las centrales de Torina y Aguayo, con una potencia instalada de 354.4 MW y una producción anual bruta de 452 MWh (Universidad de Cantabria)
- Embalse de Mediajo: También represa al río Torina, pero aguas abajo. Es de menores dimensiones, con 11 hectómetros cúbicos de capacidad. Pertenece a Viesgo y alimenta la central de Aguayo (Iagua, s.f.).

3. DATOS DE PARTIDA

3.1. Cartografía utilizada

La cartografía seleccionada para la elaboración del modelo HMS ha sido el Modelo Digital del Terreno con paso de malla de 25 metros (conocido como MDT25), disponible a través del centro de descargas del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica, s.f.). La resolución de este no es muy alta, pero para la elaboración de un modelo de cuenca tan grande es suficiente con este paso de malla, y permite aligerar las tareas computacionales en la generación de los parámetros del modelo, así como simplificar la descarga y posterior procesamiento GIS al usar menos hojas.

3.2. Usos de suelo

Los usos del suelo son fundamentales para preestablecer algunas de las características del modelo HMS, tales como el almacenamiento en la capa de la vegetación, en charcos superficiales o discernir suelo impermeable urbano. Fundamentalmente existen dos fuentes de datos que permiten ejecutar esta tarea. SIOSE y CORINE Land Cover, ambos disponibles en el centro de descargas del CNIG (Equipo Técnico Nacional SIOSE, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2018). Para esta etapa del trabajo he decidido usar la segunda (en la figura 3), que tiene una resolución menor y hace una menos subdivisión de las categorías de uso de suelo, que a una escala tan grande como la de la cuenca entera es suficiente.

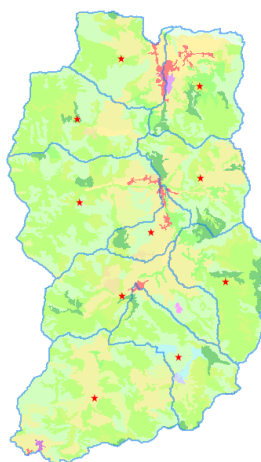


Figura 3. Mapa de usos de suelo según la capa CORINE LAND COVER.

3.3. Propiedades físicas del suelo

Es una categoría clave para poder hacer una calibración correcta de nuestro modelo hidrológico. Las propiedades físicas del suelo nos permiten tener una idea acertada de la cantidad de agua que nuestro suelo es capaz de almacenar, que capas tienen una porosidad mayor, que cantidad de percolación nos podemos esperar... Como es imposible caracterizar el suelo sin hacer un estudio in situ, se ha recurrido

a la base de datos EU-SoilHydroGrids (Brigitta Tóth, 2017), que nos otorga unos mapas con valores de porosidad, conductividad hidráulica en saturación y capacidad de campo con una precisión de 250 metros. Cada parámetro cuenta con 7 mapas correspondientes a 7 capas del suelo (para un total de 21 mapas), la primera capa es la interfaz suelo-superficie y la capa más profunda está a dos metros de profundidad (en la tabla 1 se pueden ver los espesores de cada capa).

Capa del suelo	Profundidad alcanzada (cm)	Espesor de la capa(cm)
SL1	0	0
SL2	-5	5
SL3	-20	15
SL4	-50	30
SL5	-110	60
SL6	-210	100
SL7	-410	200

Tabla 1. Espesores de cada capa



Figura 4. Imagen de ejemplo con el ráster de conductividad hidráulica de la capa SL1

3.4. Datos de precipitación

Las series históricas de precipitación son obtenidas a partir de la base de datos de la AEMET, y son el primer paso para la caracterización meteorológica de la zona de estudio. Existen actualmente más de 3300 estaciones disponibles en el territorio nacional (ilustradas en la figura 5 con el círculo amarillo), siendo seleccionadas para el estudio meteorológico las que se incluyen en la cuenca del Besaya, y en las cuencas adyacentes del Saja (al oeste) y del Pas (al este).

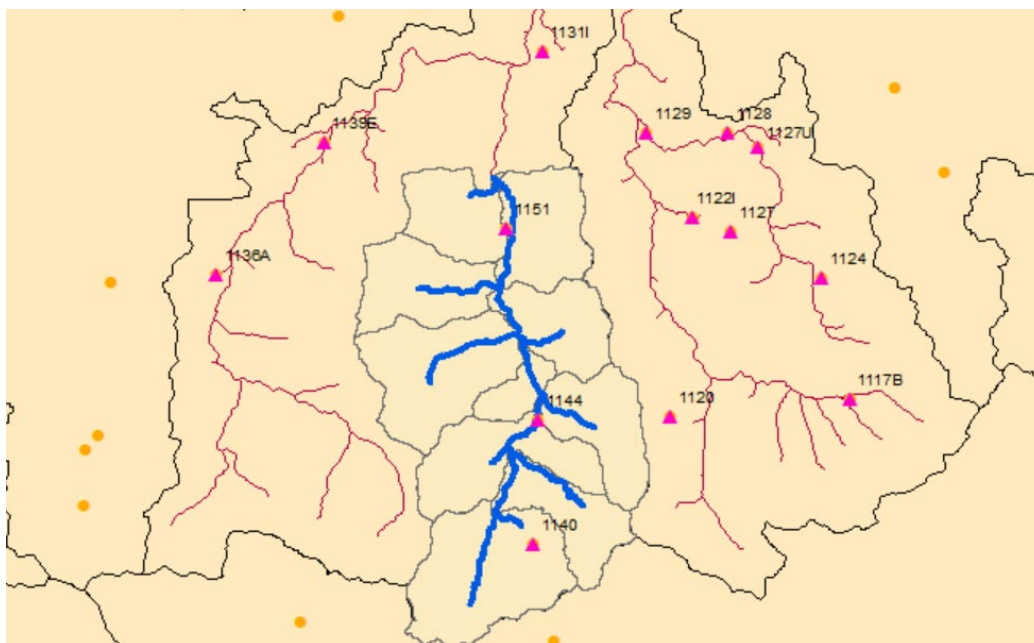


Figura 5. En amarillo: Estaciones AEMET disponibles en el sur de Cantabria y el borde con Castilla y León. Los triángulos rosas representan las estaciones AEMET dentro de las cuencas del Pas, Saja y Besaya.

3.5. Datos de temperatura

Los datos de temperatura están también recogidos a partir de la base de datos de la AEMET, siendo en este caso preseleccionadas (triángulos rosas en la figura 6) unas estaciones diferentes a las elegidas en el apartado de las precipitaciones por motivos relacionados con la fiabilidad y la extensión del periodo observado de las mismas. En cualquier caso, son adyacentes a la zona de estudio:

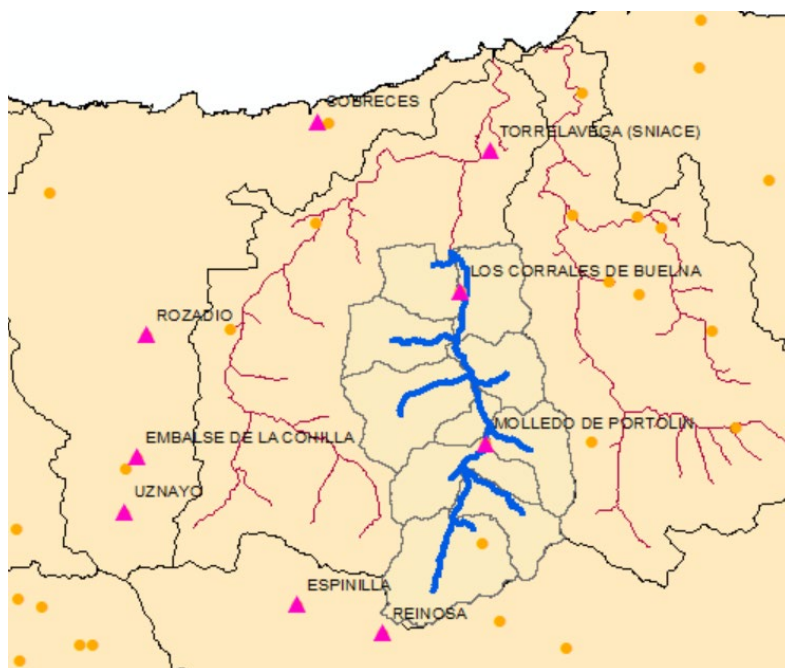


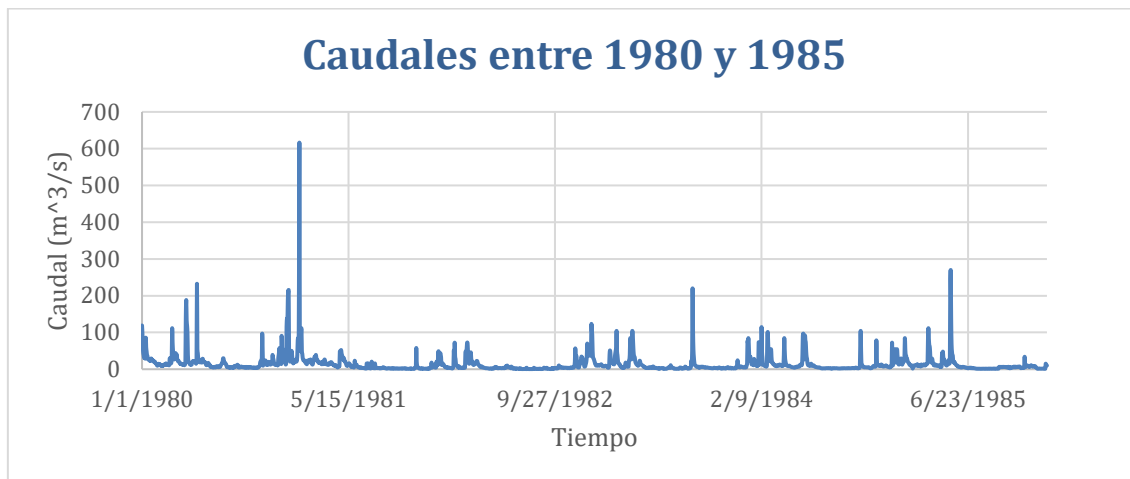
Figura 6. En amarillo, estaciones AEMET disponibles. En rosa con forma triangular, las elegidas.

La base de datos nos otorga valores de temperatura mínima, media y máxima con una resolución diaria en las diferentes estaciones que vamos a utilizar.

3.6. Series foronómicas

Los datos de aforo disponibles para el río Besaya son 3:

- Estación de aforo en Torrelavega (aguas abajo).
- Estación de aforo en Las Caldas de Besaya (límitrofe con Los Corrales de Buelna), que se puede localizar en la figura 7.
- Estación de aforo en Las Arenas de Iguña (aguas arriba de Los Corrales de Buelna).



Gráfica 2. Ejemplo para la estación de aforo de Las Caldas de Besaya

Las series de caudales se pueden obtener en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). En la gráfica 2 se ofrece un ejemplo de la serie disponible. A la hora de hacer la selección de los datos la propia aplicación interna nos advierte que la estación en Las Arenas de Iguña tiene una mala calidad de los datos disponibles, por lo que se opta por utilizar la de Las Caldas de Besaya únicamente, al tener tanto buena calidad como cantidad en sus datos. Su número de estación foronómica es el 1937 y tiene 24 años completos con datos diarios.

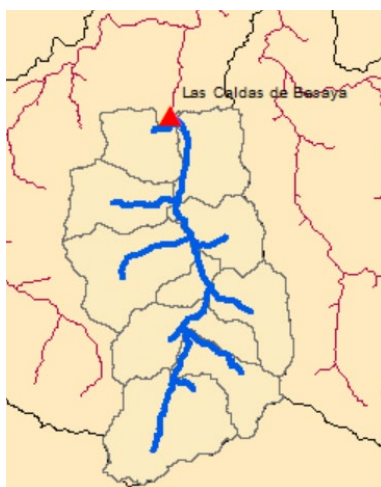
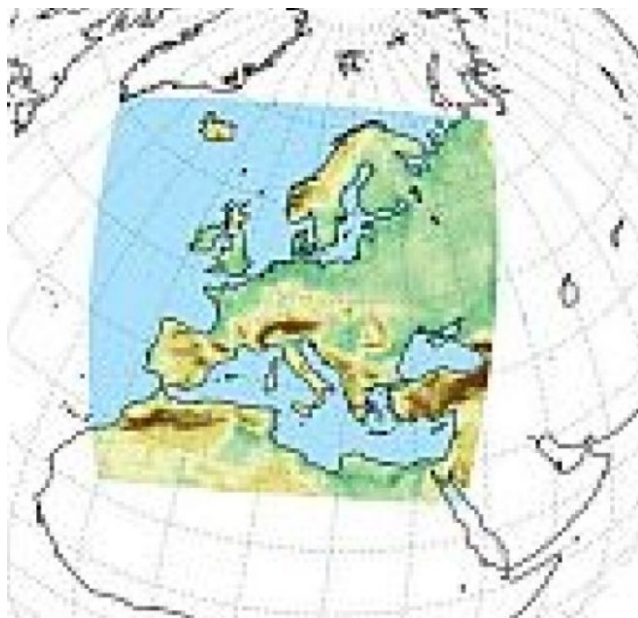


Figura 7. Localización de la estación de aforo de Las Caldas de Besaya dentro de la cuenca del Besaya

3.7. Cambio climático:

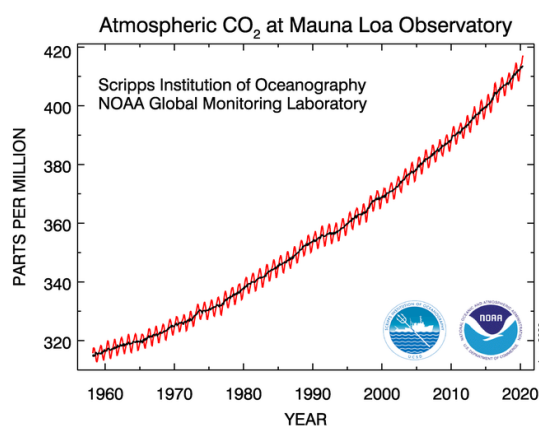
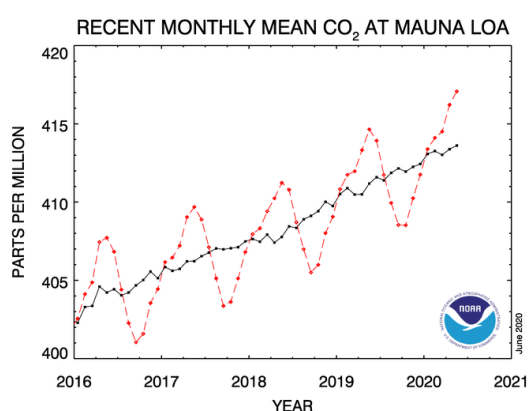
Como fuente de datos para el análisis de cambio climático se ha recurrido a AdapteCCa (MITECO, Ministerio para la Transición Ecológica, s.f.). La plataforma permite la interacción de instituciones que trabajan en asuntos relacionados con el cambio climático. Cuenta con una herramienta que aglutina los datos ofrecidos por la plataforma CORDEX.



La plataforma CORDEX representa un valiente esfuerzo por mejorar la resolución geoespacial de las previsiones de cambio climático en todo el planeta. Para ello se basa en un procedimiento llamado “Regional Downscaling”, que en castellano significaría algo similar a “reducir a escala regional” (Cordex).

El programa CORDEX en Europa está representado por EURO-CORDEX (ver figura 8 para apreciar su extensión), y abarca desde Escandinavia hasta el norte de África.

Figura 8. Mapa de EURO CORDEX obtenido de su página web (Euro-Cordex)



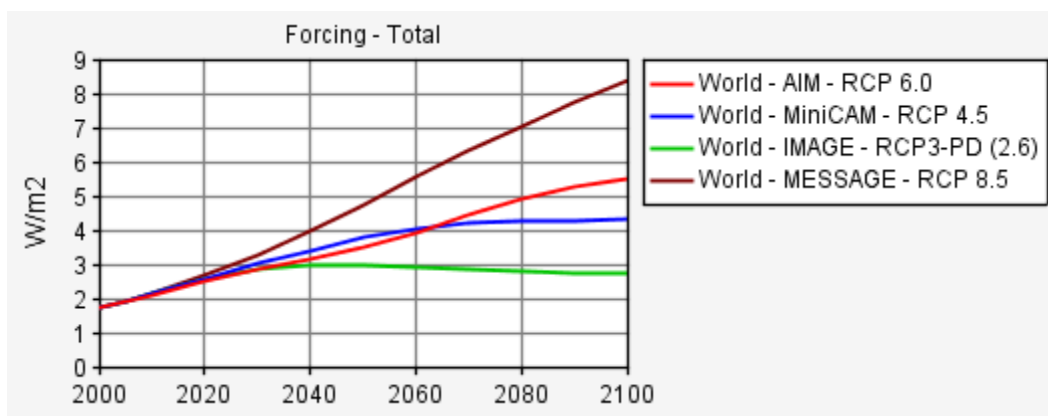
Gráficas 3 (izquierda) y 4 (derecha). Representan la evolución de la concentración atmosférica de CO₂ en el Mauna Loa (NOAA, 2020). Detalle interesante la variación estacional.

El principal parámetro antrópico que genera calentamiento global es el dióxido de carbono. En las gráficas (gráficas 3 y 4) se puede observar la evolución de la concentración de gas en nuestro planeta, medida desde el volcán Mauna Loa, en

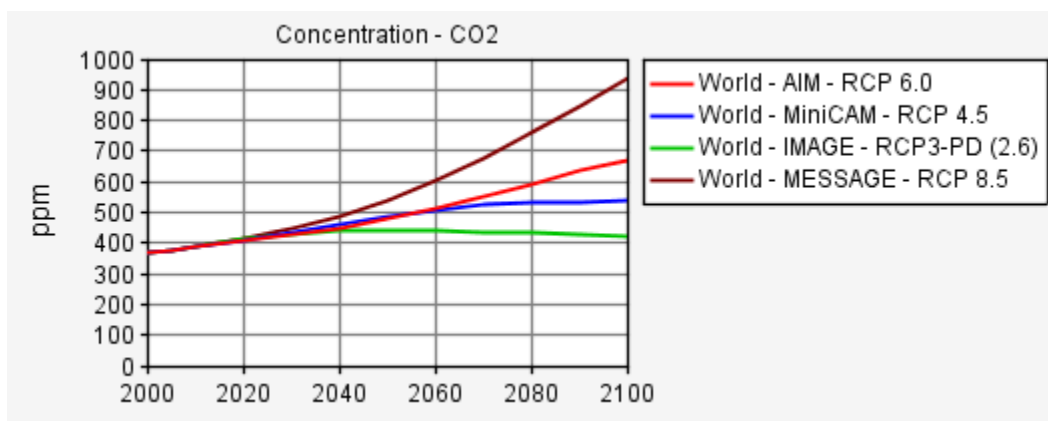
Hawái. El efecto sinusoidal es fruto de la variabilidad de emisiones y ciclos de crecimiento de la vegetación a lo largo del año, que es bastante estable en el tiempo.

Con esta información conocemos el pasado. Por ejemplo, para la época en la que tenemos caudales (1970 a 1990 más o menos), en la atmósfera la concentración de este gas se encontraba entre las 320 y los 360 (podríamos decir que, de media, unas 340 ppm). El futuro es impredecible, puesto que dependiendo de las políticas climáticas que empleemos, cuando se ponen en marcha, y cuantos países las siguen tendremos unos resultados estimados de concentración de CO₂ variables.

Es por ello por lo que se decide analizar el cambio climático según distintos escenarios. Cada escenario llega a un nivel de forzamiento irradiante (que está ligado sólidamente a una concentración de dióxido de carbono atmosférico) a través del análisis y modelado de las consecuencias derivadas de distintas políticas climáticas y socioeconómicas. Los escenarios más comunes son los RCP (International Institute for Applied Systems Analysis, s.f.).



Gráfica 5. Proyección del forzamiento radiactivo según distintos escenarios climáticos



Gráfica 6. Proyección de la concentración de dióxido de carbono según distintos escenarios RCP

A continuación, se ofrece un resumen de los escenarios RCP, cuyas consecuencias se pueden observar en las gráficas 5 y 6:

- RCP 8.5- Como su nombre indica, se llega a un forzamiento radiactivo de 8.5 W/m² para el año 2100. Este escenario es el más negativo desde un punto de vista climático, ya que se considera que el nivel de concentración atmosférica de gases de efecto invernadero sigue aumentando a un ritmo acelerado. El

escenario considera que existe un crecimiento sostenido de la población mundial, y que las principales potencias y economías en desarrollo o mantienen o aumentan sus emisiones per cápita. No es un escenario alocado, ya que la relación entre desarrollo económico y emisiones es un fenómeno que está bien contrastado. El fracaso de las cumbres climáticas intergubernamentales pasadas, como Kyoto; y las más recientes, que han tenido ausencias muy destacadas (como en los Acuerdos de París, no firmada por los Estados Unidos) dan pie a considerar este escenario. Se destaca también la falta de mejoras tecnológicas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

- RCP 6.0- Es un escenario más estabilizado, similar al RCP 8.5 en sus fundamentos socioeconómicos, pero más optimista en el apartado tecnológico que, sin llegar a asumir tecnologías de captura de carbono, sí considera una mejora en las emisiones.
- RCP 4.5- Igualmente, para 2100 el forzamiento radiactivo se estima en 4.5 W/m². Es un escenario en el que la concentración aumenta hasta 2050 (a un ritmo más pausado que hasta ahora), pero que luego se estabiliza y apenas cambia hasta el fin del siglo. Supone no solo la implementación de tecnología que permita neutralidad de emisiones (contemplando incluso el proceso de captura de carbono, Carbon Capture and Storage, en las plantas de producción energética de combustibles fósiles), sino también un consenso internacional sobre la política climática.
- RCP 2.6- Es el más optimista. Supondría que para 2100 la concentración fuera menos que la actual a 2020. Para ello se debe de suponer la aplicación mundial de políticas verdes a gran escala y el desarrollo de tecnología de captura de carbono con fecha límite en las próximas dos décadas. Cada día que pasa sin que esto suceda, estamos más lejos de contemplar este escenario.

4. SOFTWARE UTILIZADO

4.1. Software Python

Se hace uso de Python 3.7.1. Las versiones de Python 3.x.x son todas similares entre sí en cuanto al proceso y lenguaje. Un código que use Python 3.x.x posiblemente no sea compatible con versiones anteriores del mismo, como la popular 2.7. Es de código abierto, en esta versión cumple con los estándares GNU, y soporta diversos estilos de programación lo que lo hace extremadamente popular entre usuarios avanzados y usuarios con unas necesidades menos profesionales. Se puede indagar más acerca de este código en la [Web oficial del desarrollo de Python](#).

Como gestor de paquetes se ha utilizado Anaconda, en su versión 2019.03; y como gestor de cuadernos se utiliza Jupyter 1.0, por su sencillez de uso y claridad de resultados. Se pueden visitar en la [Web del software Anaconda y en la Web del proyecto Jupyter](#).

En cuanto a la lista de módulos empleados, se han utilizado los siguientes módulos o librerías:

- Pandas 0.23.4. Durante la ejecución del estudio se publicó la versión 1.0, pero no fue adoptada. Es un polivalente gestor de tablas de datos, que permite la manipulación de grandes series de datos (como la empleada en la serie sintética de caudales de 500 años) en poco tiempo mediante el uso de algoritmos internos que agilizan el tratamiento de la información. Para información de este módulo, se adjunta un hiperenlace a la [Página de la librería Pandas](#).
- Matplotlib 3.0.2. Se trata de una librería enfocada en crear visualizaciones de información, a través de tablas, mapas o animaciones. Más información en la [Web oficial de la librería Matplotlib](#).
- NumPy 1.15.4. Es una librería que permite agilizar el cálculo numérico en Python. [Web de la organización Numpy](#).
- Datetime (interno de Python 3.7.1). Permite el tratamiento de variables como variables temporales. En Python hay varias, pero Datetime está muy bien soportada por Pandas.
- GeoPandas 0.8.0. Es una extensión de Pandas para permitir operaciones espaciales. Depende de otras librerías como Fiona y Descartes, o matplotlib para hacer las figuras. Es algo exigente con estas librerías, sobre todo con Fiona, por lo que puede ser difícil de instalar al principio si Fiona está muy actualizada. Es una herramienta muy práctica que nos permite no utilizar un software GIS especializado. Es importante estar al tanto de las versiones y la documentación del proyecto en la [Web de desarrollo de la librería GeoPandas](#).

4.2. HEC-HMS

Se utiliza la versión 4.3. Este programa está desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, y permite crear un modelo hidrológico completo, seleccionando el número de subcuencas deseadas, con una gran cantidad de métodos diferentes que se ajustan a diferentes modos de simulación, y a diferentes datos de partida que podamos haber recabado.

Este software es del tipo privativo, pero es gratuito y popular por lo que existe mucha documentación y guías para su uso. Además, cuenta con integración con ArcGIS, pero no con alternativas de código libre y gratuito como Qgis.

4.3. ArcGIS

Se ha utilizado ArcMap 10.6, un programa desarrollado por ESRI. Este programa es el componente principal de la suite ArcGIS, y se utiliza para la visualización y el tratamiento de datos geoespaciales. Se ha utilizado principalmente para crear algún mapa o visualización, y para integrar al módulo GEO-HMS para la creación del modelo hidrológico. Es software privativo no gratuito, que tiene como alternativa principal al software GIS Qgis.

5. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCEDIMIENTO

Este capítulo explicará los procedimientos empleados para transformar los datos de partida en un modelo hidrológico completo que sea capaz de reproducir los eventos ya pasados de una manera fiel a la realidad observada y que nos permita finalmente introducir una serie de precipitaciones y temperaturas modificadas según los escenarios de cambio climático para obtener una serie de caudales de donde podremos extraer avenidas de inundación en un segundo estudio.

El procedimiento general sigue 4 fases bien definidas, como se puede ver en la tabla 2:



Tabla 2. Fases del procedimiento

6. MODELADO EN HEC-HMS

6.1. Construcción del modelo de HMS usando la herramienta GEO-HMS para ARCGIS

Si bien el programa de modelado hidrológico HEC-HMS permite la generación de un modelo por sí solo, contando con herramientas de importación y modificación de parámetros GIS ya incluidos, el cuerpo de ingenieros del ejército estadounidense ha tenido a bien el desarrollo de la herramienta GEO-HMS como una extensión del programa de ArcGIS.

Se parte de un modelo digital del terreno, unión de los ráster obtenidos en el apartado anterior. La herramienta ejecuta de forma secuencial una serie de geoprocесamientos que corrigen automáticamente los valores de elevación del ráster de elevaciones que pueden desarrollar problemas a la hora de generar el modelo. Genera automáticamente rásteres de pendientes, de dirección del flujo, y analiza automáticamente depresiones del terreno que conforman los cauces de los ríos. Se ha utilizado documentación de terceros como guía para desarrollar estos pasos (Blanco, 2016), así como documentación oficial del desarrollador (US Army Corps of Engineers, 2013).

Tras determinar el punto de cierre de la cuenca deseado, que en este caso será el correspondiente a Las Caldas de Besaya, para hacer coincidir dicho punto con la estación de aforo y garantizar una posterior calibración sencilla. El módulo GEO-HMS genera un modelo HMS completo, con el río Besaya, los afluentes identificados y establece unas subcuencas por defecto.

En este punto es necesario considerar con cuantas subcuencas nos quedaremos bajo la premisa de que un número superior de subcuencas conlleva un esfuerzo de introducción de datos y sobre todo de trabajo en el apartado de calibración mayor; aunque por el contrario es de esperar un resultado más afín a la realidad. Usando la herramienta de unión de subcuencas se redujo de 20 a 10 el número de subcuencas del modelo. El módulo GEO-HMS nos permite introducir los métodos que se ejecutarán en el modelo hidrológico para cada subcuenca, aunque si es necesario se pueden cambiar a posteriori en HMS. Las subcuencas tienen un número decreciente según se recorre el río en su dirección natural de flujo.

Hecho esto solo queda la obtención de algunos parámetros clave para el modelo de HMS, calculando la longitud y pendiente de los afluentes, la trayectoria de mayor longitud de escorrentía para cada subcuenca, las áreas y pendientes de cada subcuenca y la posición geográfica de los centroides de estas. Los parámetros básicos de las subcuencas se pueden consultar en la tabla 3, y en la figura 9 podemos ver el resultado GIS que se exporta a HMS, tal y como lo define el programa.

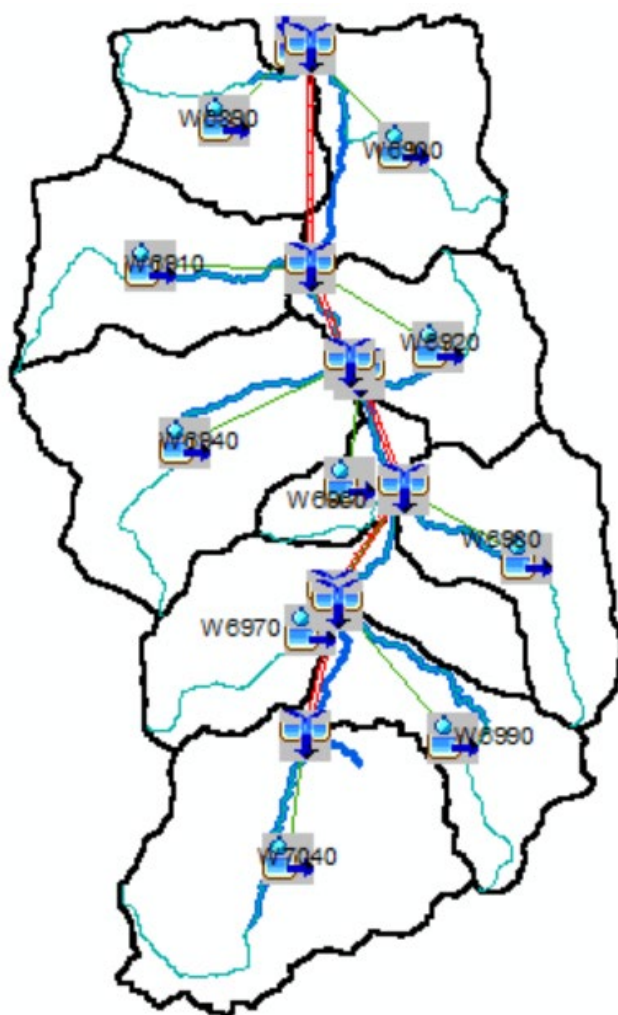


Figura 9. Resultado final del modelo a importar directamente a HEC-HMS

Nombre de la subcuenca	Pendiente media (%)	Área (km2)
W6890	28.14	34.19
W6900	30.62	42.18
W6910	38.85	42.17
W6920	32.13	35.40
W6940	38.84	64.29
W6960	22.97	14.03
W6970	33.96	48.76
W6980	31.72	40.37
W6990	37.84	35.79
W7040	30.70	74.84

Tabla 3. Propiedades básicas de las subcuencas

6.2. Pretratamiento de los datos iniciales:

Serie de precipitaciones:

Puesto que ya se ha generado el modelo HMS, podemos identificar geográficamente la posición de los pluviómetros virtuales, que serán correspondientes a un pluviómetro ubicado en la posición del centroide de cada subcuenca. Debemos dotar a cada pluviómetro virtual de una serie de precipitación propia, con el fin de generar lluvia para toda la subcuenca que le corresponde. Para ello partimos de las series de precipitación disponibles en la AEMET.

Las series de precipitación de la AEMET no son unas series fiables al 100%, ya que hay días que algunos pluviómetros están fuera de servicio y no detectan la lluvia; o tienen valores erróneos que, en definitiva, de ser incluidos tal cual al modelo de HMS producirían un resultado poco fiable y estropearían cualquier labor posterior. Por tanto, es fundamental hacer un ejercicio de corrección de los datos de partida previos a la interpolación final a los pluviómetros virtuales. En el caso de la precipitación se diseñó un código Python de elaboración propia para poder efectuar esta tarea en dos fases:

Fase 1:

En la fase 1 se busca simplemente dotar de un valor de precipitación a aquellos pluviómetros que tienen un valor nulo o inválido día a día. Para ello se construye una matriz de distancias (tabla 4) entre pluviómetro y pluviómetro reales. Es importante recordar que debemos trabajar con un sistema de referencia UTM (30N para esta zona) que saque el resultado de distancias entre uno y otro punto en metros. Como es lógico la distancia entre un pluviómetro y sí mismo es 0:

En metros	p1115	p1117B	p1120	p1122I	p1124	p1127	p1127U	p1128	p1129	p1131I	p1136A	p1139E	p1140	p1144	p1151
p1115	0	30688	29020	15920	22612	17380	12997	11217	10196	9105,6	35308	24705	38459	30296	19387
p1117B	30688	0	12032	16046	8282,4	13760	17817	19472	22336	30851	42914	38938	23227	20841	25562
p1120	29020	12032	0	13340	13579	12921	18758	19167	18912	25625	31553	29332	12511	8820,8	16574
p1122I	15920	16046	13340	0	9464,2	2653,1	6300,5	5993,6	6387,2	14809	31869	24998	24250	16959	12437
p1124	22612	8282,4	13579	9464,2	0	6822,2	9634,7	11459	15131	23856	40161	34250	26090	21044	21204
p1127	17380	13760	12921	2653,1	6822,2	0	5837,9	6489,9	8594,4	17228	34229	27616	24616	17884	14887
p1127U	12997	17817	18758	6300,5	9634,7	5837,9	0	2231,8	7495,1	15681	36947	28842	30321	23235	17582
p1128	11217	19472	19167	5993,6	11459	6489,9	2231,8	0	5409	13450	35229	26828	30236	22807	16024
p1129	10196	22336	18912	6387,2	15131	8594,4	7495,1	5409	0	8729	30072	21423	28400	20373	11290
p1131I	9105,6	30851	25625	14809	23856	17228	15681	13450	8729	0	26208	15682	32709	24378	11943
p1136A	35308	42914	31553	31869	40161	34229	36947	35229	30072	26208	0	11348	27574	23362	19467
p1139E	24705	38938	29332	24998	34250	27616	28842	26828	21423	15682	11348	0	30104	23235	13378
p1140	38459	23227	12511	24250	26090	24616	30321	30236	28400	32709	27574	30104	0	8332,6	21078
p1144	30296	20841	8820,8	16959	21044	17884	23235	22807	20373	24378	23362	23235	8332,6	0	12850
p1151	19387	25562	16574	12437	21204	14887	17582	16024	11290	11943	19467	13378	21078	12850	0

Tabla 4. Ilustra la tabla de distancias que se usa como una matriz a la hora de procesar la interpolación.

La corrección se ejecuta a continuación, con un código que día a día identifique aquellos pluviómetros con valores válidos de precipitación (no negativos y no nulos), cuya posición es guardada en un vector “bueno”; de la misma manera las

posiciones de valores inválidos se guardan en un vector “malo”; de este modo se dota a cada pluviómetro del vector malo de un valor corregido a partir de interpolación con los pluviómetros “buenos”. Se ilustra un ejemplo en la figura 10. El método elegido para esta interpolación es el de la distancia inversa ponderada (ecuación 1) (IWD por sus siglas en inglés), con la salvedad de que la distancia se eleva al cuadrado para priorizar aún más los valores de los pluviómetros más próximos al que estamos corrigiendo.

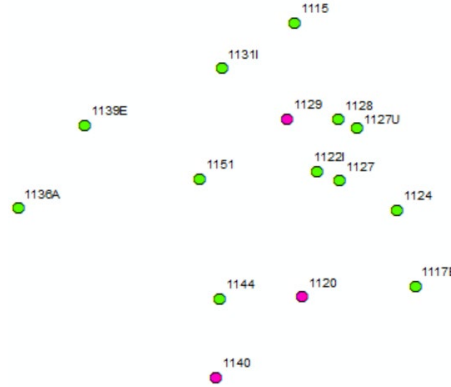


Figura 10. Ejemplo del proceso de clasificación diario de los pluviómetros. Se identifican los pluviómetros “buenos” (verde) y “malos” (rosa) que serán corregidos por interpolación.

Se describe la ecuación (1): siendo $b=2$; “G” el número de pluviómetros válidos y “d” la distancia entre el pluviómetro que se corrige y el válido.

$$\hat{p}_o = \frac{\sum_{g=1}^G d_g^{-b} p_g}{\sum_{g=1}^G d_g^{-b}} \quad (1)$$

Fase 2:

A continuación, se ejecuta un código similar, aunque en este caso el objetivo no es la corrección de ningún valor nulo sino dotar de una serie de precipitación a los centroides de las subcuencas, que constituyen los pluviómetros virtuales. El código identifica como “buenos” a los valores de los pluviómetros ya corregidos en la fase previa, y como “malos” a los valores virtuales que deseamos. Para una ilustración de este proceso, ver la figura 11. De igual manera, la interpolación es la misma; IDW con el mismo factor 2 de potencia de la distancia para favorecer a los valores más próximos al punto deseado (fórmula 1).

El resultado es una serie de precipitación con una columna por pluviómetro virtual y una fila por cada día que arranca en los años 30 y termina en los 2000. Estos 10 pluviómetros virtuales son introducidos al modelo HMS.

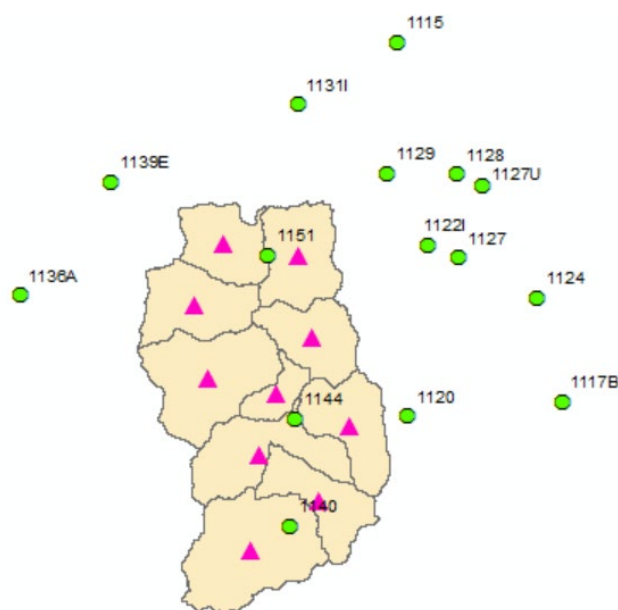


Figura 11. Proceso de interpolación de los pluviómetros reales corregidos (verde) a los pluviómetros virtuales de los centroides de las subcuencas (rosa).

Temperatura:

La temperatura es una magnitud importante a la hora de modelizar la cuenca de una forma correcta. En el modelo HEC-HMS será la encargada de modelizar la evapotranspiración según la configuración que se explicará más adelante. La serie de temperatura tiene características similares a la serie de precipitaciones, pero en general según las observaciones los valores erróneos no estaban presentes, por lo que se decidió simplificar el procedimiento de interpolación haciendo un único paso.

Utilizando un código Python de elaboración propia obtenemos una matriz de distancias entre las estaciones AEMET y los centroides de las subcuencas a los que queremos dotar de valores de temperatura, como se puede apreciar en la tabla 5:

		Subcuencas									
Estaciones	En metros	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	28807	30531	23580	26065	18817	20940	16759	23754	18967	12690
	1	29437	29693	24577	24154	18951	19037	14160	19867	14033	7533
	2	23317	28875	20554	29892	22484	27880	28318	34046	33996	31531
	3	27808	32457	23512	31408	22844	27881	26521	33432	31508	27296
	4	31249	35488	26609	33706	25032	29687	27584	34784	32042	27079
	5	15898	20269	19142	25788	24916	28017	31868	33047	36932	38624
	6	3484	2382	6943	7350	10673	10855	15610	14763	19543	23000
	7	14543	12537	11746	6351	7367	2340	3982	4311	6725	10848
	8	12348	11837	17605	18203	22444	22596	27458	25328	30867	34857
	9	10581	11691	15751	18092	21030	21966	26675	25458	30602	34038
	10	11549	17390	10917	20231	15544	20175	22689	26212	28357	28425
	11	4003	2450	6496	6320	9741	9734	14502	13706	18425	21895
	12	7594	6194	6217	3366	6032	4935	9703	9656	13751	17102
	13	24516	22817	20820	16500	15201	12294	8068	10309	4037	4053

Tabla 5. Matriz de distancias entre las estaciones y las subcuencas a las que se interpola.

Entonces podemos proceder a la interpolación de los valores de temperatura. Como los datos de temperatura no están completos al 100% -habiendo días que alguna estación no tiene valores- tenemos que identificar para cada día qué estaciones tienen datos, almacenar esta información en un vector e interpolar el valor de cada “termómetro virtual” por medio del método IDW a ese vector. Esta clasificación se ilustra en la figura 12. La fórmula y el factor cuadrático se mantienen del caso anterior para priorizar que la información de temperatura de cada centroide priorice las estaciones AEMET más cercanas.

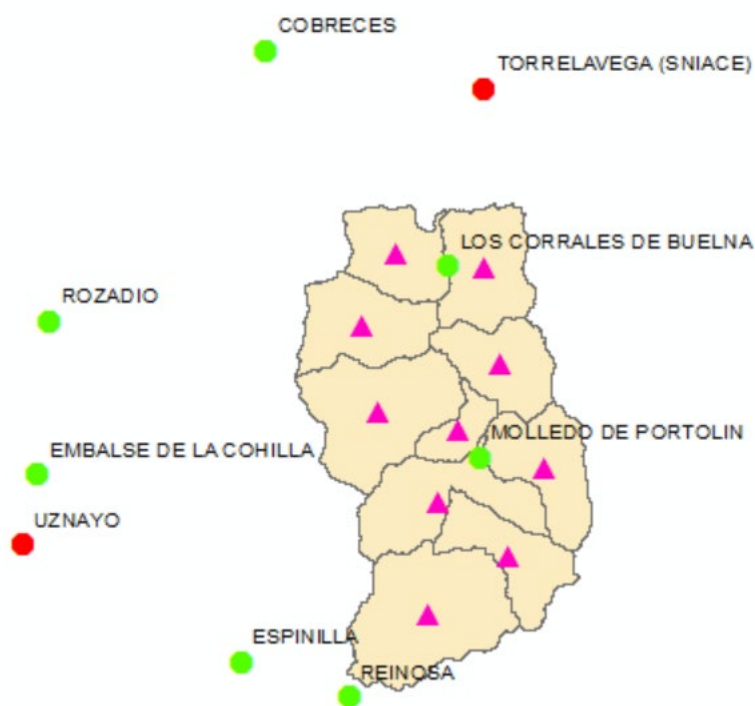


Figura 12. Ejemplo de la ejecución: Los valores con un círculo verde representan para un día; aquellas estaciones AEMET que tienen un valor de temperatura no nulo; que forman el vector al que se interpola para cada triángulo rosa; que representa los termómetros virtuales que hay en cada centroide. El círculo rojo representa las estaciones AEMET que en ese día no tienen valor y que por tanto no participan en la interpolación.

Aforos:

Los datos de caudales de Las Caldas de Besaya no requirieron tratamiento alguno. En la serie obtenida contamos con datos de entre octubre del 1970 y septiembre del 1993.

Selección de la serie temporal y establecimiento de los tiempos

Teniendo la información de partida procesada, nos interesa declarar los periodos con los que trabajará el modelo hidrológico en HMS. Es evidente que nuestro periodo debe estar limitado a las fechas en las que tenemos un valor de caudal real para comparar; pero es también interesante conocer qué nivel de calidad tenemos en los valores de precipitación. Afortunadamente, como se puede ver en el gráfico 7, en los años en los que estamos trabajando tenemos un gran número de pluviómetros (siendo 15 el máximo) por lo que el modelo cuenta con una buena información de partida.



Gráfica 7. Número de pluviómetros disponibles en el tiempo. Hay buena disponibilidad entre 1970 y 1990.

Según el funcionamiento de HEC-HMS, debemos definir esta serie temporal en tres periodos:

1. **Calentamiento:** Será el periodo más breve (3 años). El programa debe empezar a simular el comportamiento hidrológico de la cuenca a partir de unos parámetros iniciales arbitrarios. Estos parámetros no se ajustan a la realidad, por lo que es imprescindible dotarle de un tiempo al programa para que se ajuste por sí solo.
2. **Calibración:** Es el periodo más importante, donde transcurre la mayor parte del tiempo de trabajo. El retoque de los diferentes parámetros del modelo nos permitirá ajustarnos mejor a la realidad.
3. **Validación:** La calibración no puede ocupar el total de la línea temporal, ya que estaríamos adulterando el resultado al generar un modelo que posiblemente se sobreajuste a las condiciones de partida. No debemos perder de vista el objetivo, que es el de obtener un modelo fiable y flexible, que nos permita generar una serie de caudales fiable independientemente de las condiciones de precipitación y temperatura que le impongamos. Es por ello por lo que debemos ejecutar esta etapa, para evaluar de manera independiente si los parámetros calibrados funcionan correctamente en una situación diferente a la que se ajustaron.

Calentamiento			Calibración (9 años)											Validación (8 años)									
1971	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92		

Tabla 6. Control temporal para el modelo HMS

6.3. Selección de los métodos del modelo

En la primera fase hemos construido el esqueleto de nuestro modelo y en la segunda hemos obtenido los datos básicos que conducen al mismo: Precipitación (para la escorrentía y el caudal base), temperatura (para la evapotranspiración) y los caudales y tiempos de ejecución que conforman el control al modelo. El siguiente paso es, primero rellenar la gran lista de parámetros que ajustan el modelo en diferentes apartados; y en segundo lugar ajustarlos para obtener el resultado deseado. Es interesante seguir documentación de ejemplo para comprender cómo proceder en este proceso (US Army Corp of Engineers, 2016), (Román, HEC-HMS. Manual Elemental, 2015)

HEC-HMS divide el proceso de generación del caudal a partir de esos datos de partida en unos métodos que se aplican a cada problema físico. Cada método cuenta con sus parámetros, y cada elemento del modelo (10 subcuencas y 8 tramos de río) permiten tener parámetros independientes.

6.3.1. Métodos elegidos referentes a las subcuencas:

1. Canopy

Canopy, que en español se refiere a la cobertura vegetal, se encarga de dos procesos: La intercepción de una parte de la precipitación por dicha cobertura, hasta una cantidad de almacenamiento máxima; y la generación de la evapotranspiración.

Se ha decidido usar el método de **Simple Canopy**; que tiene de parámetros la cantidad inicial (irrelevante al tener un tiempo de calentamiento); y la cantidad máxima de almacenamiento; que será uno de los parámetros a calibrar.

2. Surface

Surface, que en español se traduce como superficie, se encarga de la acumulación de charcos en la superficie del terreno. Similarmente al caso anterior, se ha decidido usar el método **Simple Surface** por su sencillez, siendo los dos parámetros la cantidad de agua inicial (una vez más, de nula importancia en una simulación continua con tiempo de calentamiento); y la cantidad máxima que se puede almacenar; que será un parámetro que calibrar posteriormente.

3. Loss

Loss o “pérdidas” en castellano, es el proceso de absorción y movimiento vertical de agua en el subsuelo. Para este modelo, es la joya de la corona al ser tanto el más complejo como seguramente el más importante desde un punto de vista hidrológico. El seleccionado es **Soil Moisture Accounting** o simplemente SMA; siendo un método que se encarga de calcular la infiltración de agua desde la superficie; la retención del agua en las capas de suelo (soil), y en dos capas de subsuelo (acuíferos GW1 y GW2); además de los movimientos de agua entre estas capas y la generación de caudal a través de estas capas; ya sea aflorando a la superficie en escorrentía

cuando hay un evento de gran magnitud como generando un caudal base en condiciones de normalidad.

Se debe atender a los parámetros a considerar, pues una vez más tenemos valores iniciales para los tres tanques (el suelo y los dos acuíferos), que no son importantes en la simulación continua. Existe un parámetro de impermeabilidad que controla el porcentaje de área de la subcuenca considerado como impermeable (genera escorrentía directamente), y que será calculado posteriormente a partir de los usos de suelo pero que no entra en el proceso de calibración.

El tanque del suelo tiene como parámetros que entran en la etapa de calibración la infiltración de agua máxima procedente de la superficie, el almacenamiento máximo de la capa y el almacenamiento en tensión. Las capas de acuíferos GW1 y GW2 tienen de parámetros su almacenamiento, el agua que llega desde la capa del suelo (percolación del suelo), percolación de la capa GW1 a la capa GW2, y percolación desde la capa GW2 hacia la profundidad; que se considera agua perdida (percolación profunda) al escapar las dimensiones del modelo. Adicionalmente hay dos coeficientes en cada uno de los acuíferos que modelan el flujo de agua que generan en condiciones de saturación.

En este método hay, por lo tanto, 10 parámetros que deben de ser calibrados, ya que el porcentaje impermeable en este caso se quedará fijo.

En el manual de uso del programa (US Army Corp of Engineers, 2016) se recoge el funcionamiento de estos tres modelos que se han descrito hasta ahora como un sistema de cajas (box model) interrelacionadas. Estos tres métodos en su conjunto sirven para definir qué parte de la precipitación caída sirve para generar escorrentía, y que parte se queda retenida.

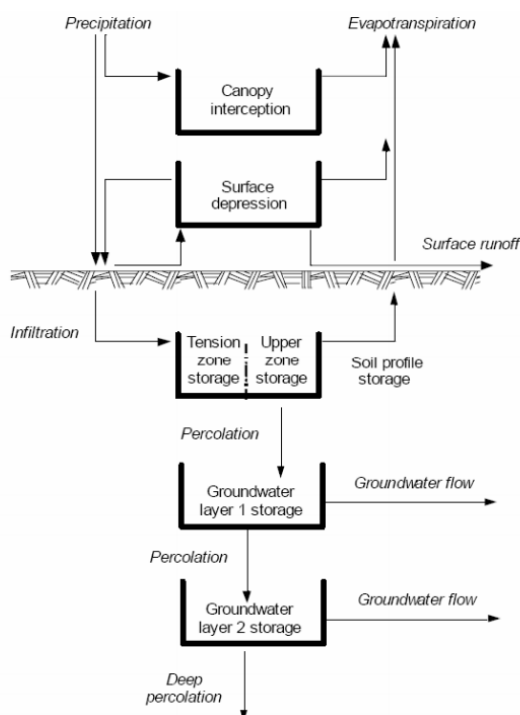


Figura 13. Esquema de este sistema de 6 cajas, obtenido del manual de uso del programa. Aglutina los métodos Simple Canopy, Simple Surface y Soil Moisture Accounting.

4. Transform

Es el método que define cómo es la esorrentía generada en el tiempo, tomando como partida la precipitación neta no retenida en los apartados anteriores. Se ha optado por usar como método el **SCS Unit Hydrograph**, aunque se consideró también el uso del hidrograma de Clark. Este método nos pide un tipo de gráfico y como parámetro tenemos el LAG time, ligado al tiempo de concentración que será calculado más adelante.

5. Baseflow

Sirve para calcular la suma de la esorrentía superficial con el flujo base y para calcular su evolución en el tiempo. Se ha elegido el método de **Linear Reservoir** por su afinidad para la simulación continua, al estar trabajando con series temporales de décadas de longitud. Este tiene 6 parámetros, tres para cada capa de acuífero GW1 y GW2. Cada uno con un flujo base inicial (irrelevante en este caso), un coeficiente (que será un parámetro susceptible a calibración), y un número de tanques para cada capa (también es calibrable).

En definitiva, como parámetros a calibrar se han recogido 16 parámetros por subcuenca, que en total suponen 160 parámetros a calibrar en este apartado. A estos hay que sumar algunos que no serán calibrados, pero sí han de ser obtenidos.

6.3.2. Método elegido referente a los tramos del río:

1. Routing

En castellano se denomina tránsito de hidrogramas. El método de routing calcula la evolución de un hidrograma según transcurre por un cauce. Se ha elegido **Muskingum** como método, ya que al tantear la opción de usar **Muskingum-Cunge** se determinó que algunos de sus parámetros eran difíciles de obtener y de calibrar como, por ejemplo, el número de subtramos. Muskingum tiene dos parámetros (Muskingum K y Muskingum X) que serán calibrados.

2. Loss/Gain:

No se incluyen pérdidas o ganancias a lo largo del cauce.

En consecuencia, hay 2 parámetros por tramo, 16 parámetros en total referentes a los tramos de río. Sumado a lo anterior resulta en la necesidad de calibrar 176 parámetros.

6.3.3. Modelo meteorológico:

El modelo meteorológico se encarga de procesar la información meteorológica de entrada (precipitación, temperatura, radiación, nieve) e implementarla en el modelo HMS. Se puede complicar más o menos eligiendo a su vez más o menos componentes. En este caso se ha elegido por implementar un modelo de

precipitación (que sería el mínimo imprescindible) y otro de temperaturas. La ausencia de datos de nieve supuso la no implementación de este componente.

1. Precipitación

Se ha escogido el **Specified Hyetograph** como método, con el fin de transformar la precipitación de entrada en un punto (con resolución diaria, en lo que hemos denominado pluviómetros virtuales, en el centro de cada subcuenca) a una distribución temporal de lluvia para toda la subcuenca.

2. Temperatura

El método elegido es el **método de Hamon**, aunque el método de Hargreaves (Román, Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves), (Samani, 1985) también podía haber sido empleado ya que se puede estimar el valor de la radiación por medio de las temperaturas máxima y mínima.

La evapotranspiración potencial de Hamon sigue la fórmula (2) (Richard G. Allen, 1998):

$$PET = k * 0.165 * 216.7 * N * \left(\frac{e_s}{T + 273.3} \right) \quad (2)$$

Donde e_s , la radiación, se calcula siguiendo la formula (3):

$$e_s = 6.108 * e^{\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right)} \quad (3)$$

N es el número de horas de sol, que HMS calcula a partir de la posición de las subcuencas; T es la temperatura media, que en este caso se aplica de forma diaria y k es una constante que en HMS hemos definido como (4):

$$k = 0.1651 \frac{mm}{g * m^3} \quad (4)$$

6.4. Establecimiento inicial de los parámetros.

Conocidos los métodos a usar y qué parámetros son necesarios es interesante hacer una labor de establecimiento inicial de los mismos siguiendo un razonamiento y a menudo partiendo de observaciones o mapas disponibles. En el apartado de datos de partida se han mostrado magnitudes físicas que guardan una relación con algunos parámetros del modelo. Es de esperar que unos parámetros de partida de calidad sirvan para aligerar la etapa de calibración; amén de generar un resultado más sólido y menos basado en el ajuste puro a los caudales observados. Igualmente, también existen algunos parámetros de los que no tenemos una información de partida, pero para los que, mediante la investigación de casos similares, podremos emitir una aproximación basada en el razonamiento, que luego será corregida en la calibración. Como valores iniciales no se ha dejado al azar ningún parámetro.

6.4.1. Usos de suelo:

Los usos de suelo nos aportan mucha información en cuanto a los apartados de la vegetación (establecimiento del almacenamiento), a la caracterización de la superficie (almacenamiento en la superficie) como también de manera directa la estimación del porcentaje de suelo impermeable. Los usos de su se visualizan en un mapa (figura 14), que se puede apreciar a mayor calidad al final del documento.

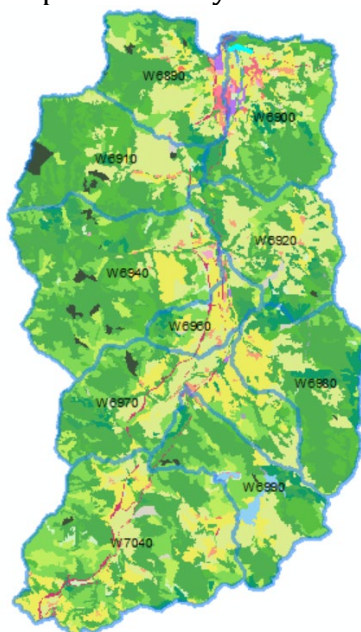


Figura 14. Usos de suelo. Verdoso: Boscoso; amarillento: Cultivo y pradería; Rojo: Urbano; Púrpura: Industrial

Inicialmente, se hace una inspección de los usos de suelo predominantes para cada subcuenca. Se recogen en la tabla (7):

Subcuenca	Descripción del uso de suelo:
W6890	Tenemos bosques de frondosas, landas y matorrales, praderas y zona urbana del municipio de Los Corrales de Buelna.
W6900	Tenemos variedad de bosques: frondosas, bosque mixto, matorrales y algo de coníferas. Agrícolamente hay parcelas de cultivos y tenemos suelo urbano en la zona Los Corrales con una zona industrial.
W6910	Principalmente bosque de frondosas, matorral boscoso de transición y landas, con una zona de pradera.
W6920	Hay una zona extensa de pradera, con bosques alternados de frondosa y coníferas.
W6940	Principalmente hay bosque de frondosa, matorrales y en la zona baja hay algo de praderas y una zona urbana.
W6960	Hay principalmente parcelas de cultivo, con una zona urbana y zonas de matorrales.
W6970	Principalmente bosque de frondosas, aunque también hay una parte de praderías.
W6980	Praderías y bosque de frondosas principalmente, con zonas de matorral.
W6990	Principalmente bosque de frondosas. Podemos encontrar las masas de agua correspondientes a los embalses de Alsa y Mediajo.
W7040	Abundan las praderías y el bosque de frondosas.

Tabla 7. Principales usos de suelo en cada subcuenca.

De esta evaluación resulta la comprensión de las cuencas en las que habrá una cobertura vegetal más importante (zonas más boscosas), a menos importantes (zonas más urbanas). El valor del almacenamiento en la capa de vegetación se estima entre 0 y 5 milímetros, siendo mayor a mayor cobertura vegetal.

Igualmente, las zonas más urbanas tendrán un almacenamiento en superficie menor. El valor de almacenamiento en superficie oscila entre los 40 y los 100 milímetros en situaciones generales. A continuación se recogen los parámetros iniciales utilizados, que son una interpretación del mapa de uso de suelo; pero que no es obtenido a través de fórmulas, y por tanto será calibrado posteriormente:

Subcuenca	Simple Canopy		Simple Surface	
	Initial Storage (%)	Max storage (mm)	Initial Storage (%)	Max Storage (mm)
W6890	50	1.5	50	50
W6900	50	1.20	50	40
W6910	50	1.65	50	80
W6920	50	1.2	50	40
W6940	50	1.4	50	70
W6960	50	1	50	40
W6970	50	1.5	50	75
W6980	50	1.5	50	75
W6990	50	2	50	100
W7040	50	1.7	50	90
	No es relevante		No es relevante	

Tabla 8. Parámetros iniciales obtenidos a partir del análisis de los usos de suelo.

El porcentaje de suelo impermeable, en la tabla (9), se obtiene calculando el área de cada subcuenca dedicada a suelo urbano o industrial. Este apartado sí que se puede calcular a través de las herramientas de GIS.

Subcuenca	Área de la cuenca (m ²)	Área urbana-industrial (m ²)	% Impermeable
W6890	34190625	2263679	6.62%
W6900	42184375	3512695	8.33%
W6910	42168125	0	0.00%
W6920	35401875	356865.667	1.01%
W6940	64289375	356865.667	0.56%
W6960	14029375	764900.667	5.45%
W6970	48758125		0.00%
W6980	40369375	688332	1.71%
W6990	35786875	438082	1.22%
W7040	74841875	511857	0.68%

Tabla 9. Parámetros obtenidos a partir del análisis de los usos de suelo.

6.4.2. Propiedades del suelo

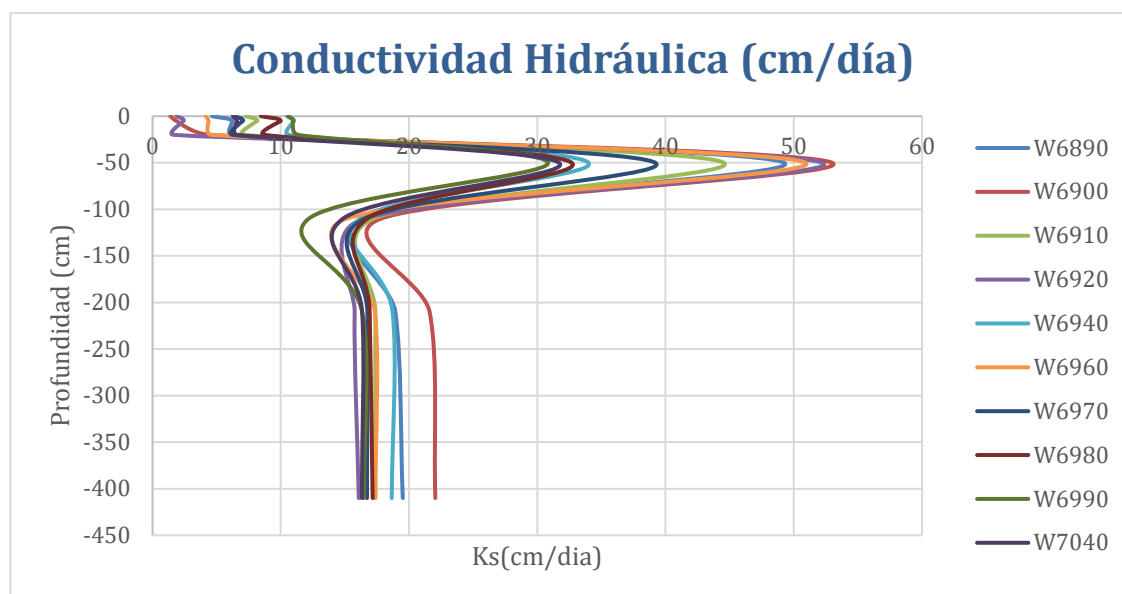
En el apartado de datos de partida se hace una descripción breve de los datos que ahora serán utilizados para la determinación inicial de la mayoría de los parámetros del método Soil Moisture Accounting. Utilizando las herramientas de tratamiento de

Ráster en el programa GIS se unen los rásteres individuales de cada capa de suelo para cada dato, ya que la cuenca atraviesa dos hojas del mapa.

Para cada dato (capacidad de campo, conductividad en saturación y porosidad) se tienen 7 rásteres correspondientes a las 7 capas de suelo de la base de datos. Se superponen los polígonos que conforman las subcuencas y se establece el valor medio de ese dato en cada una de las subcuencas, como se recoge en las tablas (10), (11) y (12).

Subcuenca	Conductividad hidráulica media en saturación (mm/h)						
	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	SL7
W6890	1.93	2.60	2.58	20.53	6.87	7.89	8.13
W6900	0.58	0.78	1.86	22.08	7.42	9.00	9.19
W6910	3.03	3.41	2.96	18.56	7.18	7.24	7.21
W6920	0.78	1.01	0.68	21.76	6.87	6.57	6.70
W6940	4.36	4.60	4.42	14.17	6.74	7.80	7.77
W6960	1.73	1.83	1.91	21.22	6.30	7.23	7.25
W6970	2.66	2.94	2.60	16.33	6.88	6.98	6.97
W6980	3.52	4.17	3.64	13.62	6.98	7.05	7.15
W6990	4.41	4.57	4.72	12.85	5.08	6.81	6.87
W7040	2.61	2.75	2.75	13.21	6.19	6.81	6.80

Tabla 10. Conductividad hidráulica estimada en diferentes capas. Valor medio de cada subcuenca.



Gráfica 8. Representa los valores medios de la conductividad hidráulica para cada subcuenca; frente a la profundidad de la capa de cada valor.

En la gráfica (8) se pueden observar tres zonas con una marcada diferencia en la conductividad (un valor para la capa superior, correspondiente a la capa de suelo; un valor máximo, que podría representar la percolación del suelo al primer acuífero; y un valor más constante a partir del metro de profundidad, que podría representar la percolación profunda que es lo que buscamos a la hora de encontrar los parámetros del método Soil Moisture Accounting). Adicionalmente podemos

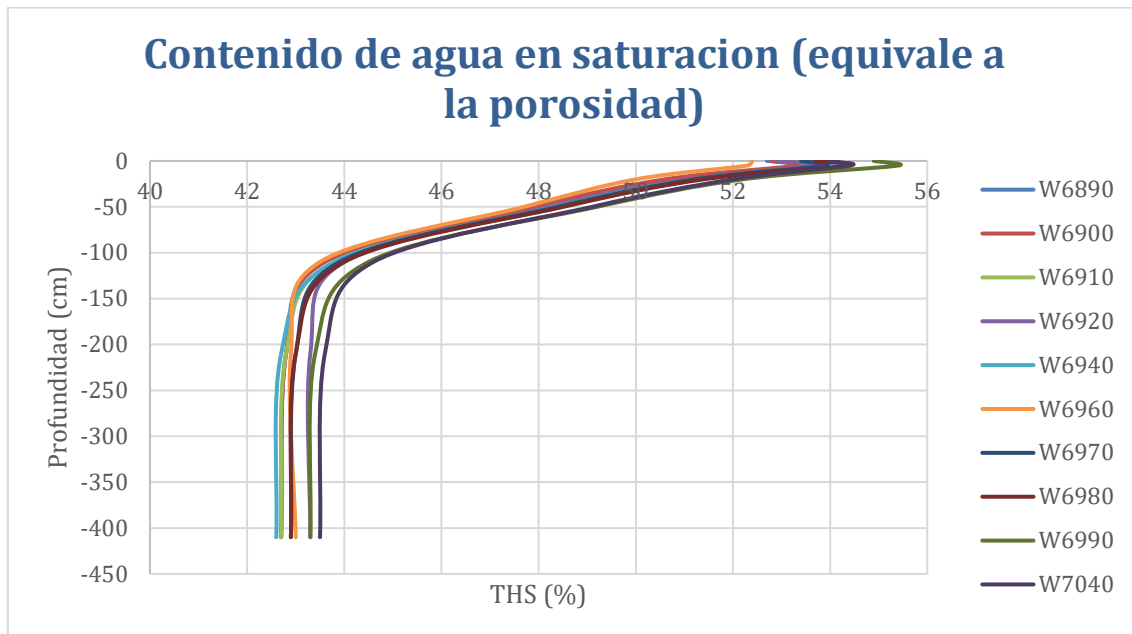
también extraer un valor para el parámetro de infiltración. La profundidad estimada inicialmente para estas tres capas sería:

- Tanque del suelo (soil): 20 centímetros de espesor
- Tanque GW1: 40 centímetros de espesor
- Tanque GW2: 350 centímetros de espesor

Este valor de la profundidad, ligado a la porosidad nos permitirá estimar el almacenamiento de cada capa de suelo. La porosidad se va a estimar a partir de los mapas de THS (Saturated water content); ya que en situación de saturación; el agua ocupa todo el volumen de poros y por tanto son la misma magnitud. Se recogen en la tabla (11):

Subcuenca	Porosidad (%)						
	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	SL7
W6890	52.7	53.4	50.8	48.1	43.6	42.8	42.7
W6900	52.8	53.3	50.6	47.9	43.6	42.8	42.7
W6910	53.3	54.2	51.3	48.5	43.8	42.8	42.7
W6920	52.9	53.7	51.2	48.4	44	43.3	43.3
W6940	53.4	54.1	51.2	48.4	43.8	42.7	42.6
W6960	52.4	52.3	50	47.7	43.5	42.9	43
W6970	53.4	53.9	51.2	48.4	43.9	43	42.9
W6980	53.7	54.4	51.4	48.5	44	43	42.9
W6990	54.9	55.4	52.2	49.2	44.5	43.4	43.3
W7040	54	54.4	52	49.1	44.6	43.6	43.5

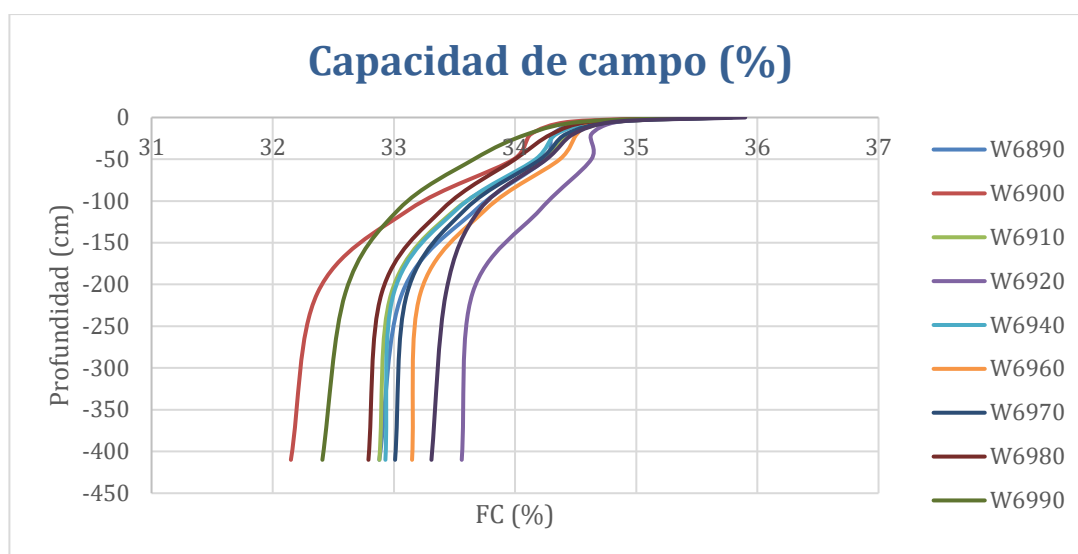
Tabla 11. Valores de la porosidad en diferentes capas promediados por subcuencas.



Gráfica 9. Se puede observar una disminución de porosidad con la profundidad. Es de esperar; ya que las capas del suelo son las más activas en actividad biológica y acción de las fuerzas naturales.

Subcuenca	Capacidad de campo (%)						
	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	SL7
W6890	35.57	34.58	34.31	34.25	33.68	33.07	32.88
W6900	35.54	34.46	34.13	33.99	33.13	32.37	32.15
W6910	35.74	34.85	34.45	34.24	33.51	32.98	32.88
W6920	35.73	34.86	34.63	34.63	34.21	33.65	33.56
W6940	35.62	34.71	34.34	34.17	33.52	33	32.93
W6960	35.63	34.67	34.51	34.37	33.76	33.22	33.15
W6970	35.79	34.83	34.42	34.21	33.59	33.11	33.01
W6980	35.58	34.63	34.3	34	33.4	32.9	32.79
W6990	35.57	34.56	34.1	33.66	33.04	32.6	32.41
W7040	35.9	34.83	34.48	34.26	33.71	33.43	33.31

Tabla 12. Valor promediado de la capacidad de campo (field capacity) para las subcuencas por capas de suelo.



Gráfica 10. Evolución de la capacidad de campo con la profundidad.

La capacidad de campo decrece con la profundidad. Este valor nos ayuda a estimar el valor del almacenamiento en tensión, que es un parámetro del tanque del suelo en el método SMA. Esta se estimará como el producto de la profundidad del tanque de suelo por su capacidad de campo. La tabla completa que recoge los valores es la (12).

Con este análisis logramos completar casi todos los apartados del método Soil Moisture Accounting, el más complejo e importante del modelo HEC-HMS. Los parámetros así calculados representan un valor medio aplicado a las 3 capas anteriormente descritas. Se recogen en la tabla (13) para una visualización directa.

Únicamente se han de estimar los parámetros de GW1 y GW2 coefficient que modelan el afloramiento del agua de estos acuíferos a la superficie. Estos no han podido ser encontrados en ninguna magnitud física pero sí que hay una idea general del orden de magnitud que deben de tener. Por ello se ha decidido usar un valor de 100 horas para el coeficiente GW1 y 1000 para el coeficiente GW2. Hay que recordar que el parámetro del porcentaje impermeable ya fue calculado anteriormente.

Flujo vertical del agua				
Subcuenca	Infiltración máxima (mm/h)	Percolación (mm/h)		
	Superficie-Suelo	Suelo-GW1	GW1-GW2	GW2-Percolacion profunda
W6890	2.4	20.5	7.6	7.6
W6900	1.1	22.1	8.5	8.5
W6910	3.1	18.6	7.2	7.2
W6920	0.8	21.8	6.7	6.7
W6940	4.5	14.2	7.4	7.4
W6960	1.8	21.2	6.9	6.9
W6970	2.7	16.3	6.9	6.9
W6980	3.8	13.6	7.1	7.1
W6990	4.6	12.9	6.3	6.3
W7040	2.7	13.2	6.6	6.6
Almacenamiento (mm)				
Subcuenca	Tensión del suelo	Almacenamiento		
	Suelo	Suelo	GW1	GW2
W6890	69.64	104.60	192.40	1506.17
W6900	69.42	104.47	191.60	1506.17
W6910	70.03	105.87	194.00	1508.50
W6920	70.15	105.20	193.60	1523.67
W6940	69.78	105.80	193.60	1506.17
W6960	69.87	103.13	190.80	1509.67
W6970	70.03	105.67	193.60	1514.33
W6980	69.67	106.33	194.00	1515.50
W6990	69.49	108.33	196.80	1530.67
W7040	70.14	106.93	196.40	1536.50

Tabla 13. Parámetros iniciales del método Soil Moisture Accounting.

6.4.3. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración, ligado al parámetro Lag time en el método SCS Unit Hydrograph, es otro de los parámetros que podemos tratar de establecer inicialmente; aunque en este caso se basará en formulación empírica. Existen multitud de estas fórmulas, con una exigencia mayor o menor del número de variables con las que juegan. Por su simplicidad se optó por evaluar la fórmula de Bransby Williams (5) y la fórmula de Kirpich (6) (Román, Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación - Escorrentía):

Bransby Williams:

$$tc(min) = 14.6 * L * A^{-0.1} * S^{-0.2} \quad (5)$$

Siendo A la superficie de la subcuenca medida en kilómetros cuadrados, L la longitud del cauce en kilómetros y S la pendiente media, sin unidades.

Kirpich:

$$tc(min) = 3.98 * \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (6)$$

Siendo L la longitud del cauce en kilómetros y S la pendiente media sin unidades.

Subcuenca	Área de la subcuenca (km ²)	Longitud (km)	Pendiente media	tc Kirpich	tc Bransby Williams
W6890	34.19	10.00	0.07	64.05	123.36
W6900	42.18	11.45	0.07	74.33	140.88
W6910	42.17	13.34	0.05	95.25	153.42
W6920	35.40	14.55	0.06	93.93	171.43
W6940	64.29	9.71	0.09	58.24	132.42
W6960	14.03	14.79	0.07	87.35	166.01
W6970	48.76	14.30	0.07	87.81	178.97
W6980	40.37	12.42	0.08	72.68	158.96
W6990	35.79	15.48	0.06	99.91	181.20
W7040	74.84	15.28	0.06	95.03	196.69

Tabla 14. Parámetro del tiempo de concentración utilizando las fórmulas (5) y (6)

Se ha decidido incluir el tiempo de concentración de Bransby Williams como parámetro del método, que se calibrará posteriormente si fuera necesario.

6.4.4. Parámetros elegidos en base a recomendaciones:

Coeficientes de descarga GW1 y GW2

En el método de Linear Baseflow, al igual que en el método SMA, se han estimado los valores de los coeficientes GW1 y GW2 en 100 y 1000 respectivamente, que constituye el orden de magnitud que se suele encontrar según la comunidad de HEC-HMS. Como es lógico habrá que poner especial interés en estos a la hora de hacer la calibración del modelo.

Para el método de Muskingum, en el apartado de Routing es necesario hacer una estimación inicial de los parámetros K y X. Para una cuenca no demasiado grande, como es la del Besaya, se puede empezar con valores de K de alrededor de las 2 horas y con una Muskingum X de 0,15. (Ramirez) Evidentemente será otro de los puntos angulares de la calibración.

6.5. Calibración del modelo

La calibración es el proceso en el que trataremos de que nuestro modelo hidrológico se ajuste todo lo posible a la realidad observada por la estación de aforo. Como se ha destacado, el número de subcuencas y la complejidad de los métodos utilizados harán variar el esfuerzo necesario para llevar a cabo esta tarea; y en este caso habrá que calibrar 176 parámetros. Pese al gran número de parámetros

empleados no todos tienen porqué variar, si se da el caso de parámetros que ya de entrada tienen un valor adecuado al modelo.

Para hacer una evaluación de la calidad del ajuste del modelo a los caudales observados en la realidad se usarán dos parámetros estadísticos que se encargan de evaluar dos problemas distintos.

- **Percent bias, o sesgo:** Representa en porcentaje el error total en la cantidad de caudal generado. Para hacernos a la idea del funcionamiento de este parámetro; si por ejemplo sobreestimamos la evapotranspiración o aumentamos mucho la percolación profunda; la precipitación generada se quedará fuera del sistema y, por tanto; el percent bias será más negativo (habrá en total menos caudal que el observado). Por el contrario; si hiciéramos de nuestro sistema que una gran cantidad del agua se transformara en escorrentía; infraestimando por ejemplo la infiltración o la percolación; tendríamos que en el punto de control del sistema llega más agua en el caudal del río; suponiendo un percent bias mayor.

Consideraremos válidos unos resultados de entorno al +/-10%

- **Nash-Suttcliffe o NSE** de manera más breve: Se utiliza para evaluar la capacidad del modelo de ajustarse al caudal observado y, por tanto, la eficacia en la predicción de series de caudales. Su función en este caso es la de intentar perfeccionar los eventos más extremos que generan un pico en el caudal y que son realmente complicados de ajustar a la realidad.

Es un parámetro que no evalúa una “media” de la serie modelada, sino que evalúa cada momento temporal independientemente y luego agrega la evaluación continua en un único valor que es el coeficiente (Cabrera).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (7)$$

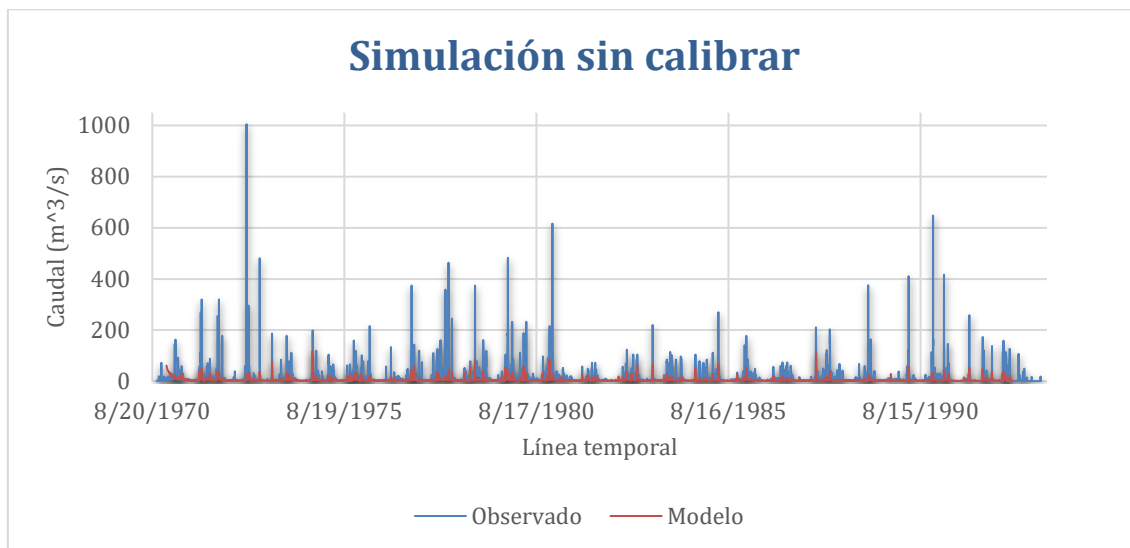
El coeficiente NSE tiene como valor ideal 1, algo alcanzable si el modelo fuera perfecto. No tienen un valor mínimo: su rango es de - infinito a 1. Consideraremos que el resultado es aceptable si supera un valor de 0.5.

Un buen resultado en el coeficiente de Nash-Suttcliffe generalmente implica que el percent bias también será adecuado o estará en el buen camino; pero no necesariamente del revés ya que podemos tener un caudal muy similar al caudal observado, pero estar haciendo un mal ajuste a los episodios más caudalosos. Es por ello que NSE será el principal objetivo de la calibración.

La calibración comienza haciendo funcionar el modelo según lo hemos definido inicialmente. Para que funcionara fue necesario modificar algún parámetro que estaba fuera del umbral que permite usar HMS (concretamente, hubo que reducir el

almacenamiento del acuífero GW2 a 1000 milímetros). Al hacer correr el modelo tenemos una comparación inicial con el caudal observado (gráfica 11).

- Percent bias previo a la calibración: -67%; ósea que hay un volumen 60% inferior al que se ha observado. Evidentemente es necesario una calibración para ajustar este valor a un nivel aceptable, pero no es un mal comienzo.
- NSE: Se obtuvo un valor de 0.07. Para ser un modelo sin calibrar no es un resultado del todo malo, pero se puede observar una falta de precisión en los picos bastante evidente.



Gráfica 11. Simulación inicial, sin calibrar.

6.5.1. Calibración manual

HEC-HMS es un programa que permite hacer una optimización automática de los parámetros deseados estableciendo un objetivo, que puede ser reducir el error en el Percent Bias o aumentar el coeficiente NSE; u otros objetivos para mejorar el ajuste. La calibración automática es, sin embargo, altamente costosa desde un punto de vista computacional y además, según las pruebas hechas; poner todos los parámetros a la vez resultará en una optimización muy irregular, donde se ve que el programa no tiene claro cuáles de ellos modificar en busca de una mejora.

Por ello es recomendable comprender cuales de esos parámetros son los más importantes a la hora de hacer la calibración y el método más rápido e intuitivo es la calibración manual de los parámetros en búsqueda de los que hacer mejorar el modelo más rápidamente.

No hay que perder de vista la posibilidad de estar “viciando” las mejoras. Que al modificar un parámetro o una serie de parámetros se obtenga una mejora de los valores de evaluación anteriormente definidos no quiere decir que esta modificación este en el buen camino, ya que el modelado de la escorrentía y todos los procesos que interactúan en el modelo están interrelacionados; resultando por tanto un sistema altamente no lineal. Si, por ejemplo, al aumentar el valor de un parámetro estamos consiguiendo un ajuste mejor del NSE, pero llega un momento

que el NSE no mejora ni modificando otros parámetros, es posible que nuestra modificación no haya sido en el buen camino; pero sí que hay que tomar perspectiva de estos “errores” o aprendizajes a la hora de identificar los parámetros más importantes para la posterior calibración automática.

Por último, una buena comprensión de los métodos, su fundamento físico y su funcionamiento sirve en gran medida para agilizar este proceso; identificando que parámetros entran en juego a la hora de producir cambios en el modelo.

En la etapa de calibración manual el trabajo se enfocó a los parámetros del Soil Moisture Accounting, con el objetivo de hacer avances rápidos que luego se afinan con la calibración automática:

En el primer intento se hicieron una serie de 11 iteraciones manuales: La tabla (15) recoge los resultados. El ajuste se centró principalmente en el valor del almacenamiento del tanque GW1, que aumentó considerablemente; y de los valores de percolación de los tanques acuíferos. A partir de ahí se intentó calibrar otros parámetros, pero los valores de evaluación no mejoraban (se estancaron en torno al 0.28 de NSE). Las circunstancias invitaban a un cambio de punto de vista.

Intento	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
% Sesgo	-57.00	-29.30	-18.30	-14.12	-14.12	-11.29	28.70	21.45	-18.66	-14.12	7.29	0.58
Nash-Sutcliffe	0.07	0.274	0.285	0.282	0.282	0.185	0.124	0.149	0.26	0.282	0.279	0.284

Tabla 15. Intentos de la primera calibración manual.

En el segundo intento, no tan bien documentado como el primero, se cambió el paradigma al hacer lo contrario del ejemplo anterior. Se redujo la cantidad de almacenamiento de las capas inferiores del método SMA, correspondientes a los acuíferos SW1 y SW2. En el caso del acuífero SW1 se redujo su almacenamiento a tan solo 20 milímetros. El resultado fue tremendamente positivo con el coeficiente NSE alcanzando los 0.4 (muy cerca ya del valor deseable de 0.5). En este punto se concluye la calibración manual para dar paso a un ajuste mayor de manera automática.

6.5.2. Calibración automática

Como se ha explicado anteriormente, el programa cuenta con un sistema de optimización automática del modelo, en el que él mismo intentará encontrar los valores óptimos de ciertos parámetros en función de un objetivo que nosotros le marquemos. El programa permite mucha flexibilidad a la hora de seleccionar qué parámetros se calibran de una sola vez (algo interesante debido a las relaciones que hay entre unos y otros), aunque se ha observado que no es tan sencillo como meter los 170 parámetros a la vez y esperar a que haga todo el trabajo.

Para este caso, se decide dividir el problema de la optimización en los diferentes parámetros de un programa. De esta manera la optimización se dará en el mismo parámetro referido a todos los elementos que componen el modelo. Por poner un ejemplo, a la hora de calibrar los parámetros del método Soil Moisture Accounting

se crean tantas optimizaciones como parámetros tiene el método (Almacenamiento en el suelo, infiltración, percolación del suelo...). Cada optimización buscará el valor óptimo de los parámetros de todas las subcuencas (o tramos). Si siguiendo el ejemplo anterior se quiere optimizar el parámetro GW1-Percolation, pues esta optimización se dirige a los parámetros GW1-Percolation de las 10 subcuencas. Es una estructura similar a un árbol que permite una buena organización del proceso de optimización. En la figura (15), podemos ver una captura de pantalla.

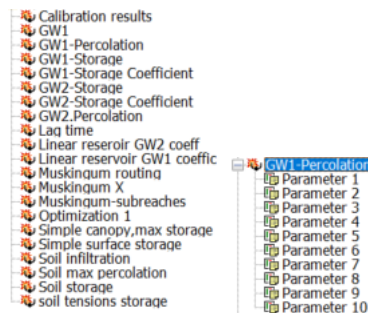


Figura 15. Diferentes optimizaciones efectuadas.
Se puede ver el "árbol" que forman con sus parámetros

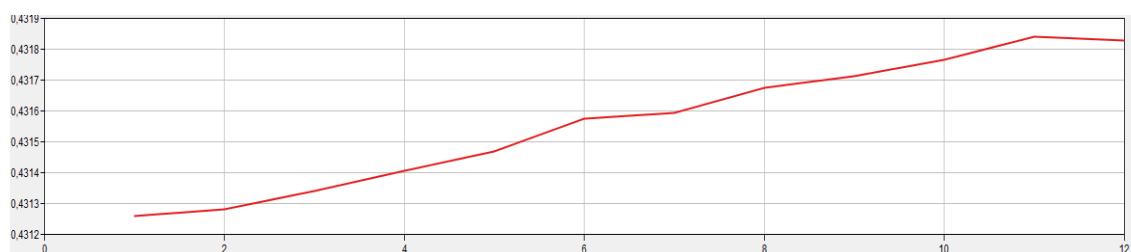
Conviene también guardar los resultados de las optimizaciones, para evaluar qué parámetros son más importantes (como un análisis de sensibilidad). Todos los parámetros de la imagen anterior han sido optimizados. Cuando se encuentra un parámetro que introduce una mejora sustancial, se adopta y se re-optimizan los parámetros más importantes (a los que el modelo es más sensible); ya que es muy probable que exista margen para la mejora tras hacer un cambio en otro parámetro. Se recogen en el siguiente apartado los más importantes. Se han recogido todos los resultados de la calibración en el anexo A "Proceso de Calibración)

6.5.2.1. Parámetros más importantes (Análisis de sensibilidad)

Soil Moisture Accounting:

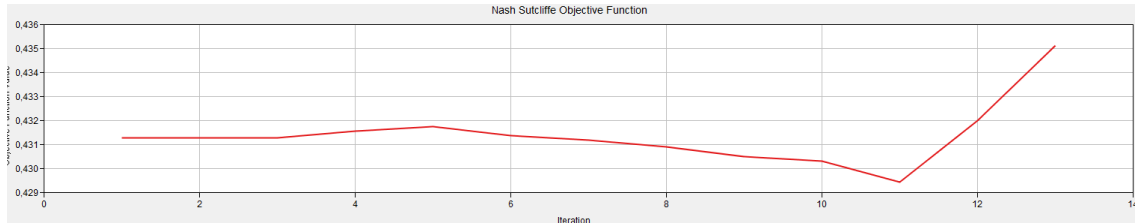
Los parámetros a los que el modelo se muestra más sensible son los relacionados con el acuífero GW1:

GW1-Percolation:

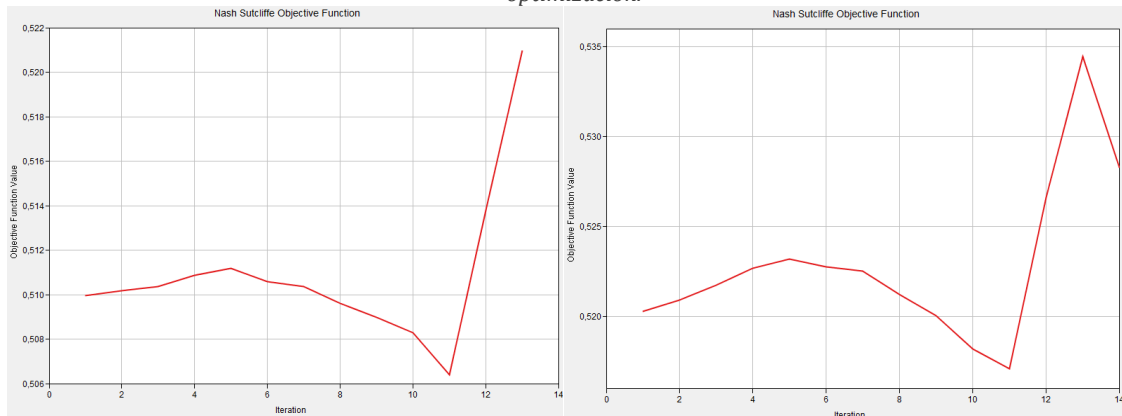


Gráfica 12. Proceso de iteración automática para la optimización del parámetro GW1-Percolation

GW1-Coefficient (como se optimiza varias veces, se muestran varias optimizaciones)



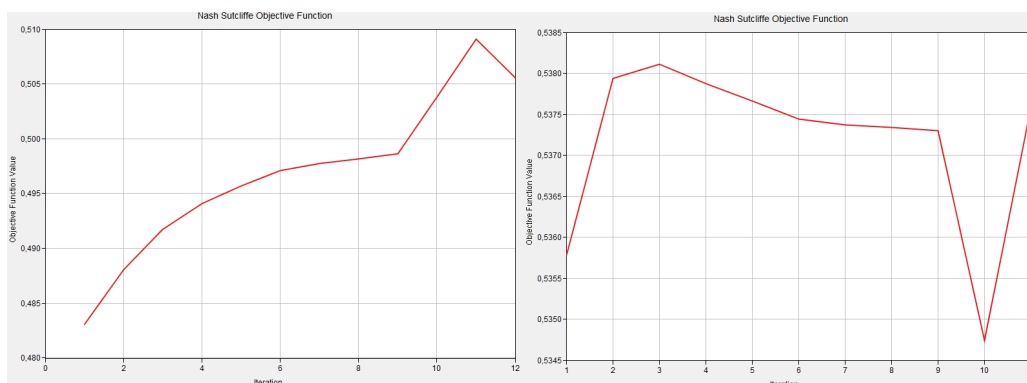
Gráfica 13. Proceso de iteración automática para la optimización del parámetro GW1-Coefficient. Primera optimización.



Gráficas 14 (izquierda) y 15 (derecha). Proceso de iteración automática para la optimización del parámetro GW1-Coefficient. Cada una representa una optimización diferente.

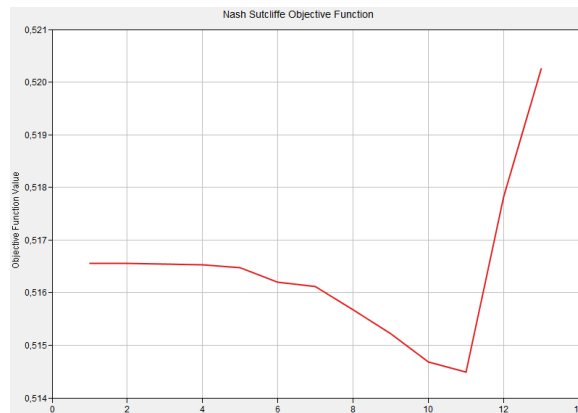
GW2- Storage también fue decentemente impactante.

Muskingum routing: Mientras que el parámetro X apenas afectó al resultado del modelo; el parámetro K, que controla el momento de ocurrencia del pico del caudal resultó ser un parámetro clave para la mejora del modelo, como se puede apreciar en las gráficas (16) y (17). Era de esperar una importancia significativa; ya que este valor se estimó de una manera muy sencilla inicialmente. Se optimizó varias veces:



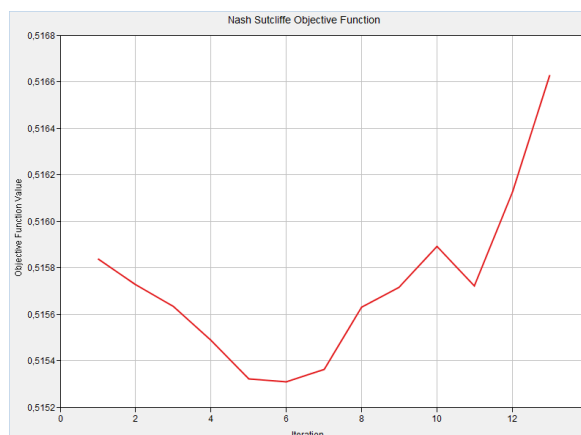
Gráfica 16 (izquierda) y 17 (derecha). Proceso de iteración automática para la optimización del parámetro Muskingum K, con dos optimizaciones diferentes.

Linear Reservoir Baseflow: El parámetro coeficiente GW1 resultó ser aquí también particularmente importante:



Gráfica 18. Proceso de optimización del parámetro GW1-Coefficient.

Simple canopy: El parámetro de almacenamiento máximo de la vegetación también resultó ser particularmente interesante:



Gráfica 19. Proceso de iteración automática para la optimización del parámetro Canopy max storage.

6.6. Resultados de la calibración y validación

6.6.1. Parámetros calibrados:

En las tablas se adjuntan los parámetros resultantes en el proceso de calibración. Como bien se indicó antes; son 176 en total; aunque tras la calibración hay algunos que han permanecido con el valor que tenían inicialmente. En las tablas (16), (17) y (18) se recogen todos los parámetros ya calibrados.

Soil Moisture Accounting										
Parámetro/Subcuenca	SUB1	SUB2	SUB3	SUB4	SUB5	SUB6	SUB7	SUB8	SUB9	SUB10
Infiltración máxima (mm/h)	4	5	5	5	5,5	6	5,5	5	6	7
Porcentaje del suelo impermeable (%)	6,6	8,3	0,0	1,0	0,6	5,5	0,0	1,7	1,2	0,7
Almacenamiento en la capa de suelo (mm)	104,6	104,5	105,9	105,2	102,5	99,9	102,4	103,0	104,9	103,6
Almacenamiento en tensión (mm)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Percolación de la capa de suelo (mm/h)	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	2,1	4	3,7	4	5
Almacenamiento del acuífero GW1 (mm)	20	20	20	20	25	25	25	25	25	25
Percolación del acuífero GW1 (mm/h)	3	3	3	3	2	3	2,4	2,4	2	2
Coefficiente del acuífero GW1 (h)	197,7	167,0	138,8	113,2	90,3	69,9	52,1	69,3	24,4	20,0
Almacenamiento del acuífero GW2 (mm)	40	40	40	40	45	40	45	45	45	45
Percolación del acuífero GW2 (mm/h)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Coefficiente del acuífero GW2 (h)	1600	1600	1600	1600	1600	1200	1200	1200	1200	1200

Tabla 16. Parámetros del Soil Moisture Accounting calibrados.

Método	Parámetro/Subcuenca	SUB 1	SUB 2	SUB 3	SUB 4	SUB 5	SUB 6	SUB 7	SUB 8	SUB 9	SUB 10
Simple Canopy	Almacenamiento en la capa de vegetación (mm)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Almacenamiento máximo en la superficie (mm)	6,2	5,7	5,2	4,7	4,2	3,7	3,2	2,7	6,0	5,5
Simple Surface SCS	Lag time (min)	123,4	140,9	153,4	171,4	132,4	166,0	179,0	159,0	181,2	196,7
Linear Reservoir	Coefficiente GW1 (h)	160,3	147,3	134,3	121,3	108,3	95,3	82,3	69,3	56,3	43,3
	Coefficiente GW2 (h)	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200

Tabla 17. Parámetros de métodos de subcuencas ya calibrados.

	Método	Muskingum Routing	
	Parámetro	Muskingum K (h)	Muskingum X
Subtramos	R6710	5,33	0,48
	R6730	5,00	0,15
	R6750	3,50	0,15
	R6760	3,25	0,15
	R6790	3,00	0,15
	R6810	2,75	0,15
	R6820	2,50	0,15
	R6850	2,25	0,15

Tabla 18. Parámetros de Muskingum Routing calibrados.

6.6.2. Evaluación y validación

Según los parámetros definidos en el apartado anterior, se valorará la precisión de los datos generados a partir de los parámetros de sesgo (percent bias) y coeficiente NSE o Nash Suttcliffe. El criterio de evaluación es comúnmente usado en el mundo de la hidrología (Molner, 2011)

Los resultados (ver tabla 19 para la evaluación, y gráfico 21, 22, 23 24 y 25) muestran que el trabajo de calibración ha sido satisfactorio puesto que en la

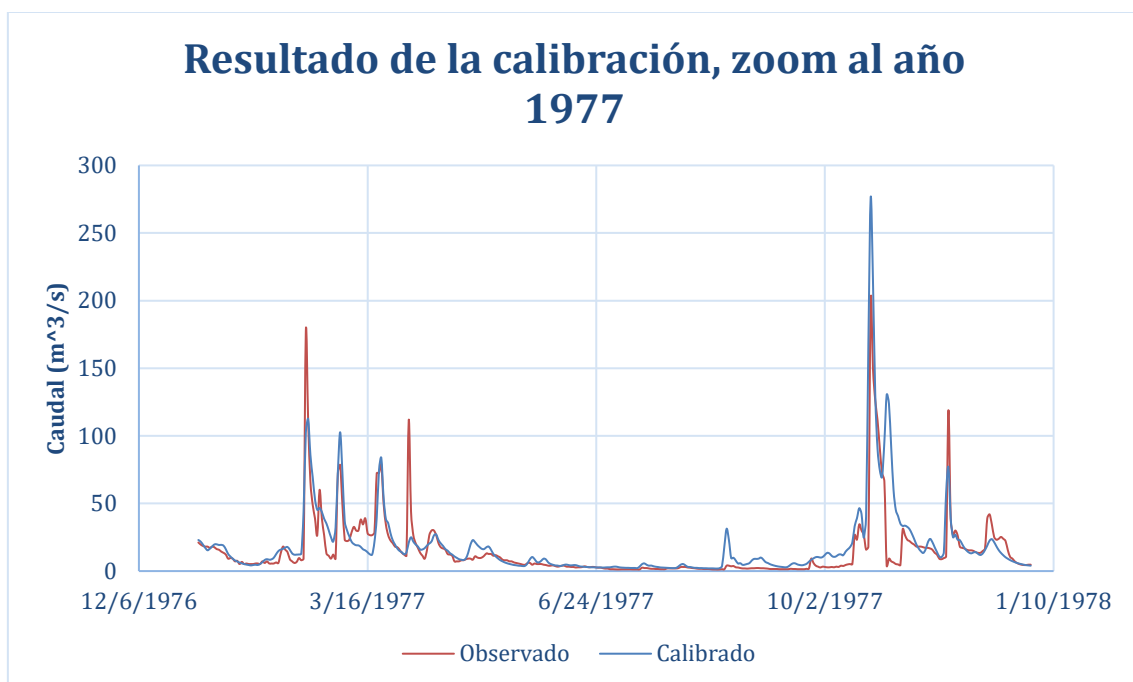
validación el modelo se sigue ajustando correctamente a los caudales observados. El hecho que el valor de NSE sea mejor en la validación es perfectamente posible, ya que depende en gran medida de la naturaleza de los datos observados; y es posible que en la etapa de validación estos hayan sido más estables, favoreciendo el ajuste.

	Calibración	Validación
Coefficiente NSE, Nash Suttcliffe	0.524	0.589
Sesgo, Percent Bias (%)	4.41%	11.56%

Tabla 19. En amarillo, resultado aceptable. En azul, resultado bueno. En verde, resultado muy bueno.

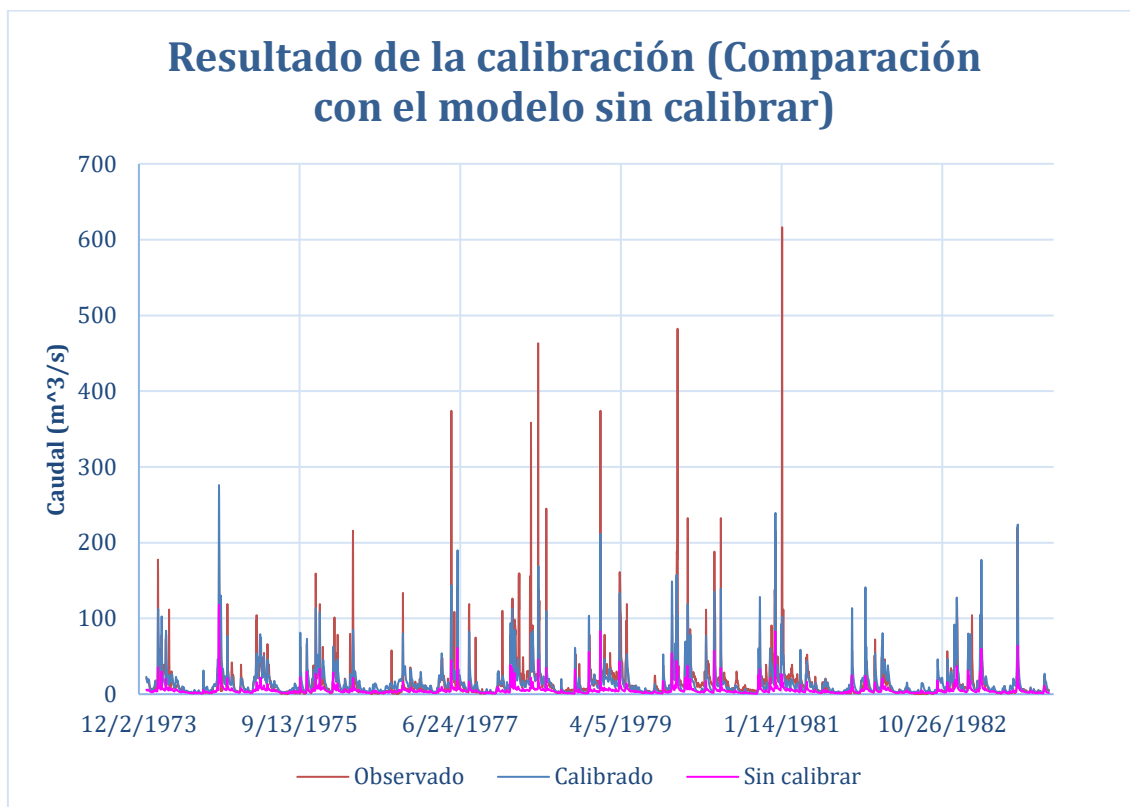


Gráfica 20. Resultado de los 9 años de calibración.

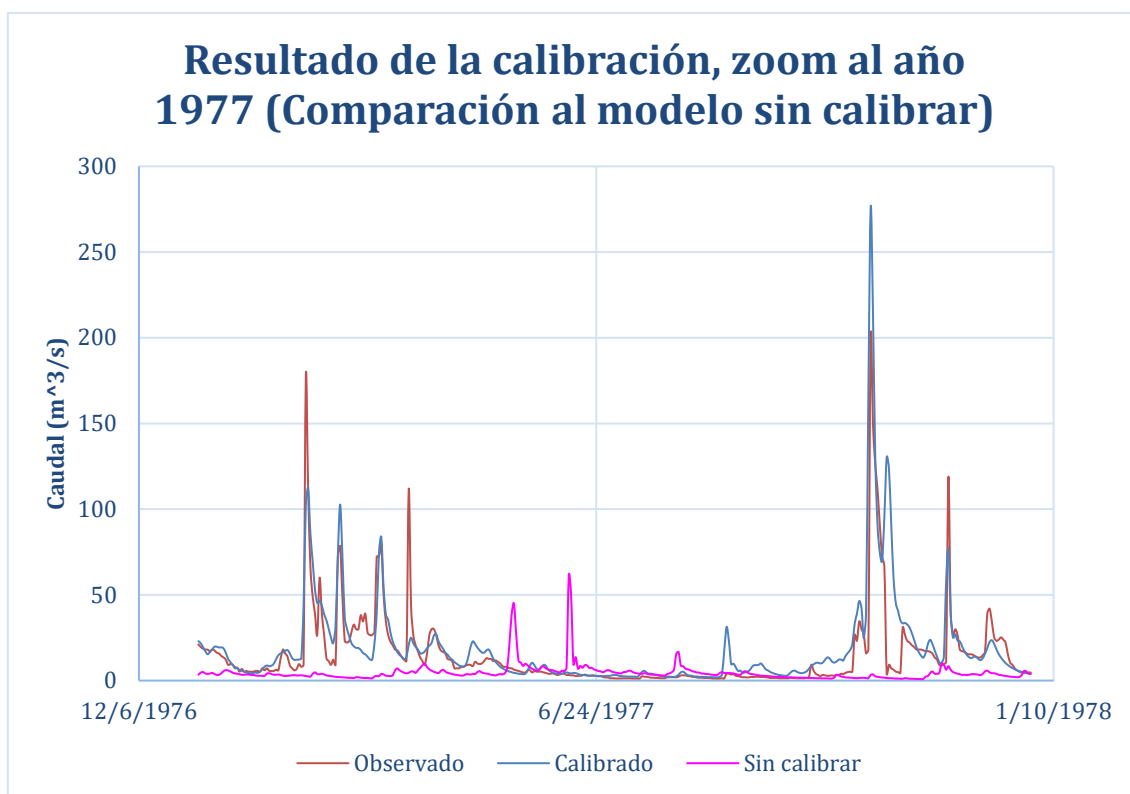


Gráfica 21. Zoom a un año para evaluar mejor que tal es el ajuste.

Resulta interesante también valorar la mejora sobre el modelo sin calibrar:

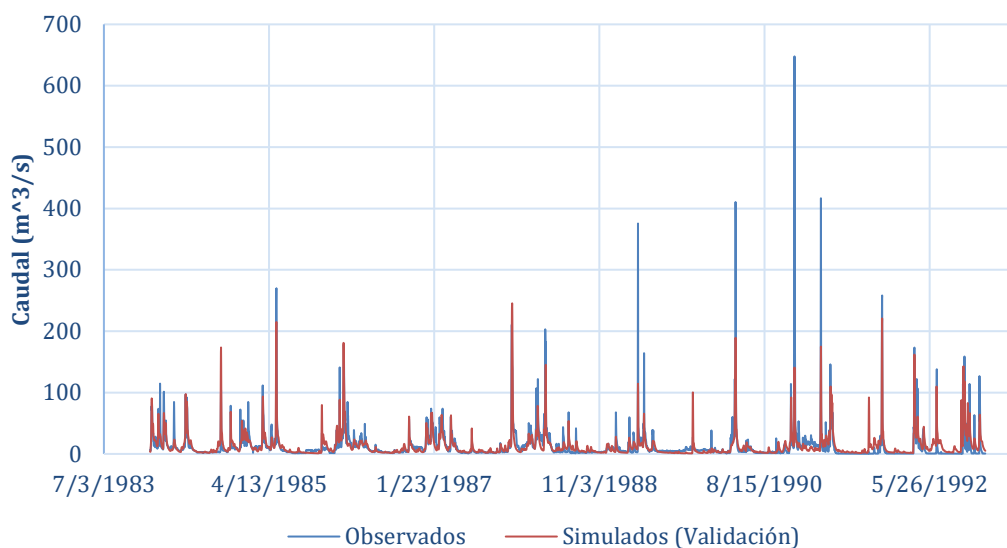


Gráfica 22. Años de calentamiento y calibración como comparación con el modelo sin calibrar.



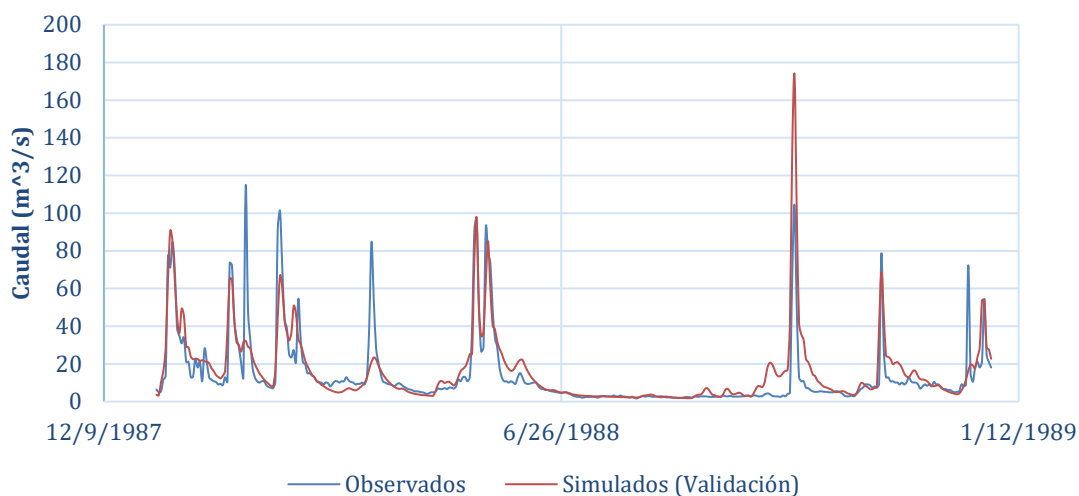
Gráfica 23. Zoom al año 1977 para ejemplificar la gran mejora con respecto al modelo sin calibrar.

Resultado, serie de validación



Gráfica 24. Serie de 8 años de validación.

Resultado, serie de validación, zoom al año 1988



Gráfica 25. Ejemplo de un año de la serie de validación, para una inspección visual del ajuste del modelo.

7. CAMBIO CLIMÁTICO

En este estudio, se ha decidido adoptar un procedimiento de análisis de la evolución del cambio climático el cual no se base únicamente en una escala de las series temporales de precipitación y temperatura, sino que también considere alteraciones en la generación de eventos de precipitación con el objetivo de modelar mejor los eventos más extremos del futuro.

A la hora de hacer un análisis de inundación, fruto de un análisis de los caudales del río, la serie de precipitación es claramente más importante que la serie de temperatura. Es importante que el cambio climático tenga en cuenta ambos factores, pues es evidente que ambos juegan su particular papel. No obstante, pensar en un evento de inundación implica como condición de la lluvia algo de torrencialidad, algo que es imposible modificar haciendo una escala a la serie de precipitaciones, y por ello esta serie deberá ser estudiada a un nivel más exhaustivo.

El periodo en el que se efectuará el análisis es el comprendido entre 2060 y 2080 (20 años). Periodos más lejanos aumentan la incertidumbre en cuanto a qué escenario parece más probable, mientras que periodos más cercanos mostrarán muy poca diferencia entre el RCP 4.5 y el RCP 8.5.

7.1. Parametrización estadística de la precipitación

La precipitación total a lo largo de un año puede tener un mismo valor para dos lugares diferentes, pero su naturaleza no tiene porqué ser la misma. Es posible que en uno de estos lugares llueva poco, pero muy frecuentemente; mientras que en otro llueva en pocas ocasiones, pero se dan lugar eventos muy copiosos de lluvia. Estudiar si el cambio climático afecta no solo a cuanta agua cae sino también a su frecuencia, nos permitirá modelar mejor el futuro de los eventos extremos de la zona de estudio.

Ligado a lo anterior, se evidencia la necesidad de modelar el proceso de generación de precipitación como un producto de dos factores: La frecuencia de lluvia y la magnitud del evento. La modelización de la lluvia es un tema candente por sí solo. Se ha elegido optar por un modelo estocástico consistente de la generación de eventos independientes según una distribución de Poisson, siendo el valor de dicho evento generado aleatoriamente a partir de una distribución exponencial. Se conforma, por tanto, un suceso marcado de Poisson (F.Laio, 2001).

Para dicho análisis, se asumen una serie de simplificaciones:

- Como condición del proceso de Poisson, se ha de asumir la independencia entre un evento y otro. Si bien es una asunción razonable, sobre todo para climas donde la frecuencia de la precipitación es bastante elevada, evidentemente no es de una precisión absoluta. Básicamente un suceso de Poisson asume que la probabilidad de que ocurra un suceso en un día d es siempre la misma; independientemente del valor del día anterior. No obstante, la realidad es más compleja y sí que la probabilidad de un suceso de lluvia depende del instante anterior.

- Se asume que la precisión del suceso de Poisson es de un día. La lluvia como suceso presenta este problema, ¿cuál es el paso temporal que nos marcamos para definir si ha llovido o no? Evidentemente es un factor importante, y de hecho va muy ligado al punto anterior, ya que si nos marcáramos una escala inferior a la diaria (por ejemplo, la horaria), el punto anterior se volvería mucho más polémico puesto que se evidencia que a esa escala es muy complicado asumir la independencia del suceso. La escala diaria es la que se contempla como mínima a la hora usar esta metodología y, además, todos los datos que recibimos, tanto de la serie histórica como de los escenarios de cambio climático usan este criterio diario.
- Otro punto muy interesante es la independencia de un suceso a una escala no temporal sino geográfica. Es evidente que hay retroalimentaciones de este tipo, ya que la probabilidad de que llueva en un punto varía de si está lloviendo en puntos contiguos (e incluso de la intensidad de la lluvia de estos puntos adyacentes). Afortunadamente podemos simplificar esto utilizando una pluviometría general para la cuenca, ya que la cuenca del río Besaya es de unas dimensiones comedidas. Hay que comprender la limitación que tiene esta asunción, que no se puede aplicar a cuencas de gran tamaño.
- El uso de la distribución exponencial para “seleccionar” la magnitud de cada evento es uno de los puntos más sólidos ya que según las pruebas en esta cuenca este método funciona correctamente. Habría que corroborarlo de aplicar una metodología similar en cuencas con una climatología diferente ya que la distribución de precipitación de estas quizás se ajustara a otras distribuciones. Esta distribución tiene ventajas interesantes como contar únicamente con un parámetro; además, si se quisiera tener en cuenta la interceptación de lluvia por parte de la vegetación, una simple escala de la distribución bastaría para ello (no es necesario en este caso pues ya nos hemos encargado de ello en el modelo HMS, pero no está de más).

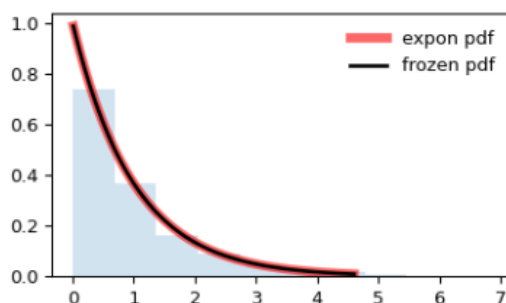
Siguiendo los criterios de nomenclatura empleados en (F.Laio, 2001), tenemos los parámetros:

- Lambda, λ : será el parámetro ligado al proceso de Poisson, y expresa la frecuencia (días⁻¹) de los eventos. Por tanto, el periodo medio entre eventos es $1/\lambda$. La distribución de tiempo entre eventos de precipitación sigue la ecuación (8):

$$f_T(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau} \quad \text{for } \tau \geq 0. \quad (8)$$

- Alpha, α : será el parámetro que controle la intensidad de los eventos de precipitación. Se define como el evento medio de precipitación. La intensidad se describe a partir de la función de densidad de probabilidad exponencial (9):

$$f_H(h) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{\alpha}h} \quad (9)$$



Gráfica 26. Representa la forma de una distribución exponencial normalizada. Es su PDF. (Scipy)

El producto de $\alpha * \lambda$ representa la precipitación media diaria, una propiedad muy útil a la hora de obtener los valores de estos parámetros, ya que si sabemos la precipitación total en un periodo (por ejemplo, un mes) y el número de día de lluvia podemos calcular por ejemplo el parámetro λ .

7.1.1. Obtención de los parámetros estadísticos en la serie histórica

Utilizando la serie histórica de precipitación no corregida se ha elaborado un código en Python que se dedique a leer dichas series, clasificar cada día para una época del año y obtener los parámetros estadísticos de dichas series. El motivo de usar la serie no corregida es el de evitar los “falsos eventos” que se producen al interpolar ya que, si uno de los pluviómetros declarase precipitación en un día, los corregidos ese día tendrían precipitación arruinando completamente el esfuerzo de este programa.

Se ha optado por hacer una división en meses, de tal manera que los parámetros van variando a lo largo del año, ajustando así mejor las condiciones de frecuencia y copiosidad de la precipitación. La mensual es una escala adecuada ya que hay bastantes datos para cada mes (con series de 20 años, del orden de 600 datos por mes). La escala semanal también hubiera funcionado (aunque igual podría haber algún problema resultante de tener una base de partida algo pobre con 140 datos para cada semana en una serie de 20 años).

La escala diaria sería demasiado volátil para ser usada, haciendo saltar a los valores demasiado. Se podría aplicar una escala diaria haciendo luego una corrección para suavizar los valores. Una escala estacional también sería aceptable (aunque seguramente se perdiera mucha precisión en algunos momentos claves del año) y, evidentemente, utilizar una escala anual sería una mala idea al destruir toda la variabilidad que hay en un año.

Como estamos usando una serie no corregida, no se tienen en cuenta los valores nulos o que tienen errores. Esto, como se va a evidenciar más adelante, no presenta problemas si los datos que faltan no son excesivos en proporción (como es el caso)

Para obtener los parámetros el procedimiento es muy sencillo:

1. Se cuentan los días válidos (no nulos ni erróneos) para cada mes de la serie (independientemente del año). El resultado es n_{mes}^{total} , habiendo lógicamente 12 valores.
2. Se cuentan los días con precipitación de cada mes (u otra escala si fuera elegida). El resultado es $n_{mes}^{con\ lluvia}$, con 12 resultados también.
3. Se suma la precipitación total de cada mes. El resultado es p_{mes}^{total} .

Como se han descartado los valores erróneos o nulos en todas las cuentas el resultado esta normalizado. Por tanto, se pueden extraer los parámetros estadísticos de forma muy sencilla usando las fórmulas (10) y (11):

$$\lambda = \frac{n_{mes}^{con\ lluvia}}{n_{mes}^{total}} \quad (10)$$

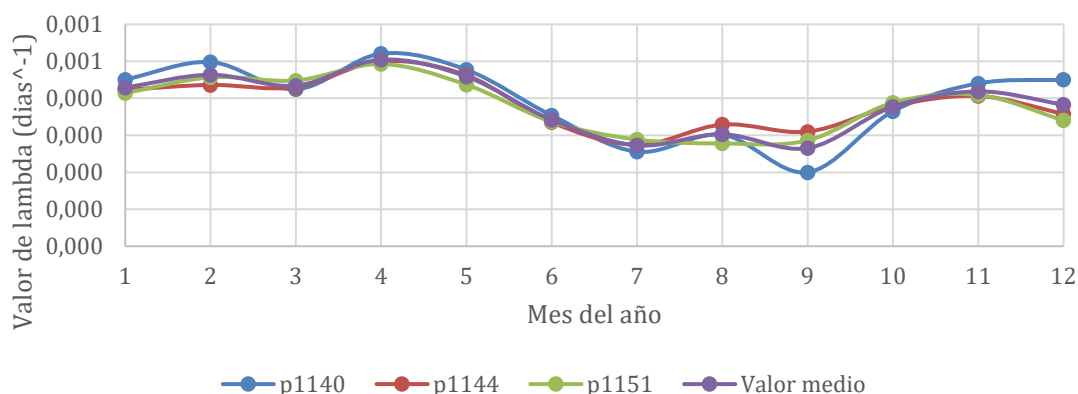
$$\alpha = \frac{p_{mes}^{total}}{n_{mes}^{con\ lluvia}} \quad (11)$$

Este procedimiento se ha aplicado a las series de los tres pluviómetros presentes en el interior de la cuenca. Se obtienen los siguientes resultados, en la tabla (20):

λ , frecuencia de eventos					
	Mes	p1140	p1144	p1151	Valor medio
Invierno	Enero	0,451	0,423	0,414	0,429
	Febrero	0,498	0,436	0,457	0,464
Primavera	Marzo	0,424	0,430	0,448	0,434
	Abril	0,521	0,500	0,493	0,505
	Mayo	0,477	0,462	0,437	0,459
Verano	Junio	0,354	0,335	0,337	0,342
	Julio	0,256	0,274	0,289	0,273
	Agosto	0,301	0,329	0,278	0,303
Otoño	Septiembre	0,200	0,310	0,286	0,265
	Octubre	0,365	0,379	0,388	0,377
	Noviembre	0,440	0,406	0,409	0,419
Invierno	Diciembre	0,451	0,358	0,340	0,383

Tabla 20. Parámetro λ calculado por meses a partir de la serie histórica.

λ (Frecuencia de los eventos) por meses:

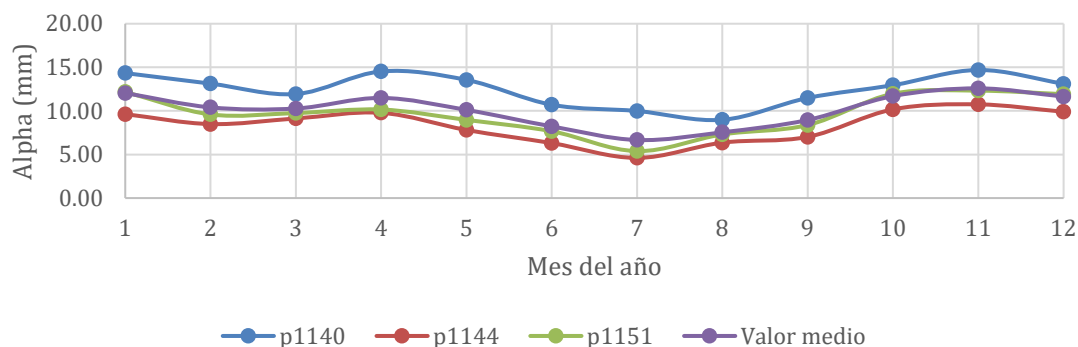


Gráfica 27. Evolución del parámetro λ según avanza el año.

α , Precipitación media de evento					
	Mes	p1140	p1144	p1151	Valor medio
Invierno	Enero	14,34	9,63	12,18	12,05
	Febrero	13,13	8,49	9,60	10,40
Primavera	Marzo	11,93	9,13	9,75	10,27
	Abril	14,53	9,78	10,16	11,49
	Mayo	13,56	7,81	8,97	10,11
Verano	Junio	10,70	6,31	7,66	8,22
	Julio	9,99	4,61	5,38	6,66
	Agosto	8,98	6,36	7,30	7,55
Otoño	Septiembre	11,49	7,02	8,38	8,96
	Octubre	12,95	10,18	11,97	11,70
	Noviembre	14,69	10,75	12,32	12,59
Invierno	Diciembre	13,12	9,90	11,92	11,65

Tabla 21. Parámetro α calculado por meses a partir de la serie histórica.

α , precipitación media de los eventos, por meses:



Gráfica 28. Evolución del parámetro α por meses.

7.1.2. Adaptación de los parámetros al cambio climático

Usando la base de datos de cambio climático ADAPTECCA, que recoge información de cambio climático según diferentes modelos climáticos para diferentes escenarios; podemos conseguir una adaptación de los parámetros anteriormente calculados según las expectativas de cambio climático para la zona del Buelna y la cuenca del Besaya. Para la precipitación, debemos hacer un análisis de la evolución tanto de la frecuencia de precipitación, como de la media de los eventos de precipitación. Afortunadamente, la recalibración de estos parámetros es relativamente sencilla, al tener disponibles resúmenes con las expectativas de días de lluvia anuales (el inverso de λ), y también al disponer de unas expectativas de la precipitación media diaria (no confundir con el parámetro α). A partir de este último podemos encontrar el parámetro α , ya que:

$$\alpha * \lambda * 365 = P_{anual}^{total} \quad (12)$$

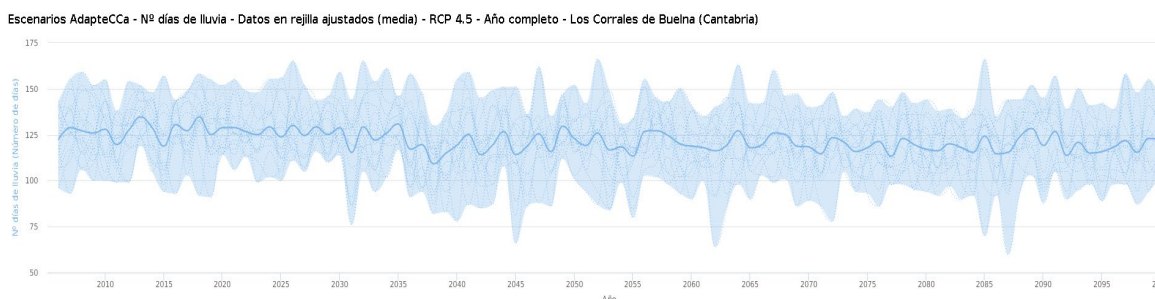
Lo que evidencia que:

$$\alpha * \lambda = P_{diaria}^{media} \quad (13)$$

siempre que λ este expresado en dia^{-1} .

7.1.2.1. Escenario RCP 4.5

Días de lluvia: Se aprecia alguna variación. Tomando como referencia la media de los pluviómetros para el parámetro λ (anual), tenemos un valor de 0.388 que será la referencia. En la tabla (22) se observa la evolución de ese periodo. Se toma el valor medio de los 20 años, para el conjunto de los modelos. La comparación con el coeficiente λ de referencia para el periodo 1971-1993 es de una disminución de un 15% del número de eventos de lluvia.



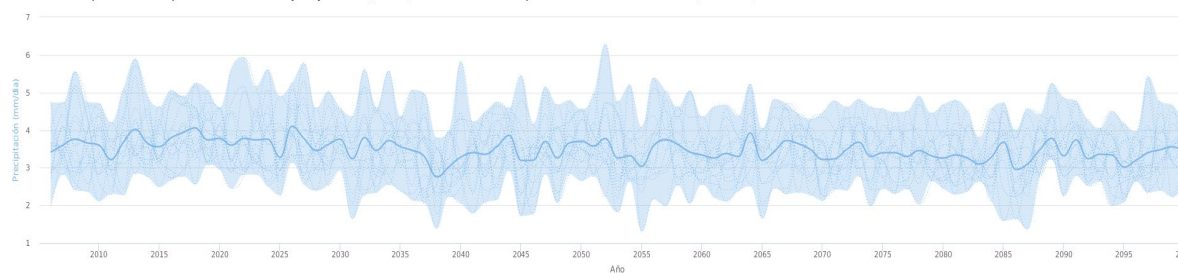
Gráfica 29. Evolución del número de días de lluvia anuales con el cambio climático. En azul oscuro está la media de todos los modelos climáticos que maneja AdapteCCa. La envolvente azul contiene el rango del máximo al mínimo.

RCP 4.5			
Año	Días de lluvia (modelo mínimo)	Días de lluvia (conjunto de los modelos)	Días de lluvia (modelo máximo)
2060	90	118,8125	141
2061	100	118,125	135
2062	64	116,25	140
2063	85	119,3125	145
2064	98	127,1875	163
2065	90	117,875	142
2066	103	119,8125	142
2067	99	125,75	160
2068	101	125	146
2069	86	118,75	147
2070	89	118,25	140
2071	86	114,5	141
2072	78	123,5625	148
2073	105	121,0625	135
2074	94	115,8125	139
2075	93	117,875	137
2076	86	121,25	144
2077	98	113,375	140
2078	98	123	148
2079	95	119,625	142
2080	94	117	144
Valor medio	92	119,6279762	143,7619
λ	0,252055	0,32774788	0,393868

Tabla 22. Días de lluvia entre los años 2060 y 2080 para el escenario 4.5. Se calcula el parámetro lambda.

Precipitación total: Se procede a hacer un análisis similar de las estimaciones de precipitación diaria media. En este caso, la referencia de α medio anual para el periodo 1971-1993 era de 10.14 milímetros. La comparación resulta en un aumento de α de un 2.65% (ver tabla 23)

Escenarios AdapteCCa - Precipitación - Datos en rejilla ajustados (media) - RCP 4.5 - Año completo - Los Corrales de Buelna (Cantabria)



Gráfica 30. Evolución de la precipitación media anual según el escenario RCP 4.5 en AdapteCCA.

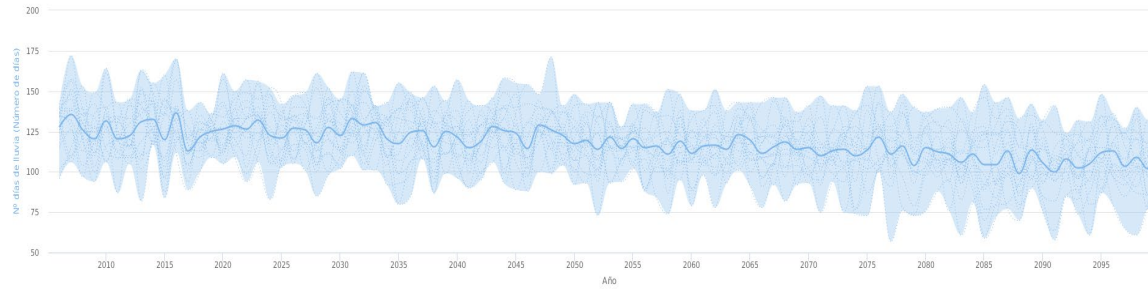
RCP 4.5					
Año	Precipitación media (mm) mínimo)	diaria (modelo)	Precipitación diaria media (mm) (conjunto de modelos)	Precipitación media (mm) máximo)	diaria (modelo)
2060		2,56	3,33		4,36
2061		2,22	3,25		4,62
2062		2,11	3,38		4,66
2063		2,37	3,30		4,38
2064		2,51	3,92		5,23
2065		1,66	3,19		4,04
2066		2,46	3,43		4,82
2067		2,30	3,71		4,71
2068		2,34	3,65		4,43
2069		2,27	3,47		4,30
2070		2,13	3,22		4,46
2071		2,43	3,24		4,78
2072		2,40	3,48		4,62
2073		2,78	3,67		4,82
2074		1,98	3,29		4,62
2075		2,44	3,40		4,57
2076		2,31	3,40		4,48
2077		2,43	3,29		4,51
2078		2,04	3,45		4,90
2079		2,64	3,32		4,46
2080		2,45	3,25		4,68
Valor medio		2,33	3,41		4,59
λ		0,25	0,33		0,39
α		9,22	10,41		11,66

Tabla 23. Valores proyectados por AdapteCCa para la precipitación media anual. Se calculan los parámetros estadísticos.

7.1.2.2. Escenario RCP 8.5

Días de lluvia: Se aprecia una mayor variación que en el escenario 4.5 (lógico teniendo en cuenta que es un escenario más agresivo). Tomando como referencia la media de los pluviómetros para el parámetro λ (anual), tenemos un valor de 0.388; que será la referencia. En la tabla (tabla) se observa la evolución de ese periodo. Se toma el valor medio de los 20 años, para el conjunto de los modelos. La comparación con el coeficiente λ de referencia para el periodo 1971-1993 es de una disminución de un 20% (ver la tabla 24) del número de eventos de lluvia.

Escenarios AdapteCCA - Nº días de lluvia - Datos en rejilla ajustados (media) - RCP 8.5 - Año completo - Los Corrales de Buelna (Cantabria)



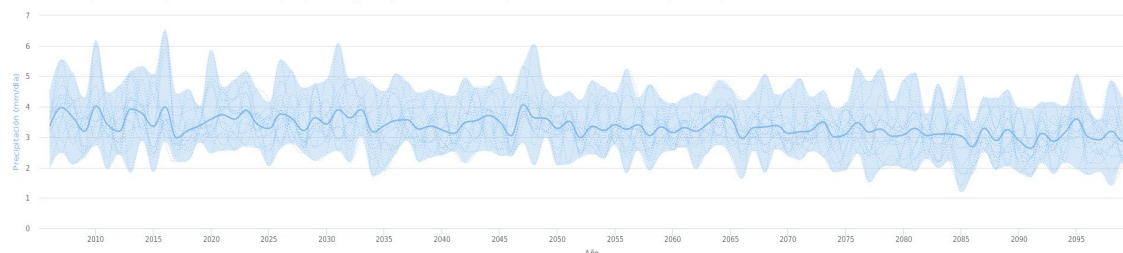
Gráfica 31. Evolución de los días de lluvia anuales para el escenario RCP 8.5 en AdapteCCA.

RCP 8.5			
Año	Días de lluvia (modelo mínimo)	Días de lluvia (conjunto de los modelos)	Días de lluvia (modelo máximo)
2060	79	111,6875	138
2061	98	116	138
2062	78	116,625	151
2063	93	113,9375	138
2064	101	123,0625	143
2065	91	119,375	143
2066	78	111,3125	143
2067	92	115,6875	146
2068	82	118,625	146
2069	92	114	137
2070	93	114,75	141
2071	75	109,9375	147
2072	94	112,8125	141
2073	75	114	141
2074	74	109,8125	138
2075	73	113,5625	153
2076	100	121,5625	153
2077	57	111	137
2078	76	116,125	148
2079	73	103,75	140
2080	76	114,75	137
Valor medio	83,33333	114,3988	142,8095
λ	0,228311	0,313421	0,391259

Tabla 24. Días de lluvia entre los años 2060 y 2080 para el escenario 8.5. Se calcula el parámetro lambda.

Precipitación total: Se procede a hacer un análisis similar de las estimaciones de precipitación diaria media. En este caso, la referencia de α medio anual para el periodo 1971-1993 era de 10.14 milímetros. La comparación resulta en un aumento de α de un 15% (ver tabla 25). Esto supone; no obstante que la precipitación total cae; ya que α sube menos de lo que baja λ .

Escenarios AdapteCCA - Precipitación - Datos en rejilla ajustados (media) - RCP 8.5 - Año completo - Los Corrales de Buelna (Cantabria)



Gráfica 32. Evolución de la precipitación media anual según el escenario RCP 4.5 en AdapteCCA

RCP 8.5				
Año	Precipitación media (mm) (modelo mínimo)	diaria (mm) (modelo)	Precipitación diaria media (mm) (conjunto de modelos)	Precipitación media (mm) (modelo máximo)
2060		2,95	3,63	4,73
2061		3,09	3,80	4,95
2062		2,26	3,67	5,12
2063		2,86	3,95	5,00
2064		3,16	4,24	5,59
2065		2,77	4,17	5,30
2066		1,89	3,41	4,84
2067		2,94	3,82	5,14
2068		2,12	3,83	5,83
2069		3,01	3,90	5,06
2070		2,74	3,59	5,25
2071		2,60	3,64	5,67
2072		2,92	3,71	4,98
2073		2,70	4,01	5,21
2074		2,14	3,46	4,55
2075		2,21	3,57	4,72
2076		2,85	4,01	6,06
2077		1,75	3,65	5,56
2078		2,26	3,75	6,02
2079		2,38	3,49	4,81
2080		2,27	3,54	5,62
Valor medio		2,58	3,76	5,22
λ		0,23	0,31	0,39
α (mm)		11,30	12,01	13,34

Tabla 25. Valores proyectados por AdapteCCA en el escenario RCP 8.5 para la precipitación media anual. Se calculan los parámetros estadísticos.

Se ha decidido hacer el análisis cambio climático con los resultados del parámetro 8.5 ya que posteriormente se han de ejecutar una serie de procesos que son bastante lentos desde un punto de vista computacional; y el escenario RCP 4.5 va a presentar unas características bastante similares a la serie histórica en cuanto a caudales. En

conclusión, utilizando los parámetros estadísticos anteriormente descritos, se han confeccionado una nuevas tablas (26) y (27) con los nuevos valores de α y λ adaptando la variación observada a los valores antiguos de estos parámetros.

Mes	Lambda serie histórica (d^{-1})	Días del mes	Lambda- RCP 8.5 (d^{-1})
1	0.429275	31	0.34677
2	0.463686	28	0.374568
3	0.434263	31	0.350799
4	0.504503	30	0.407539
5	0.458717	31	0.370553
6	0.341852	30	0.276149
7	0.272748	31	0.220327
8	0.302833	31	0.24463
9	0.265353	30	0.214353
10	0.377363	31	0.304835
11	0.418554	30	0.33811
12	0.383037	31	0.309418

Tabla 26. Se muestran los parámetros λ actualizados al tener en cuenta las variaciones observadas en el análisis de los escenarios RCP. La columna de días del mes es necesaria para motivos que se verán más adelante.

Mes	Alpha serie histórica	Alpha - RCP 8.5 (mm)
1	9.63	11.55
2	8.49	10.19
3	9.13	10.96
4	9.78	11.74
5	7.81	9.37
6	6.31	7.57
7	4.61	5.53
8	6.36	7.63
9	7.02	8.42
10	10.18	12.21
11	10.75	12.90
12	9.90	11.88

Tabla 27. Se muestran los parámetros α actualizados al tener en cuenta las variaciones observadas en el análisis de los escenarios RCP

7.2. Generación sintética de la serie de precipitación futura

Según el objetivo último de este trabajo, que es la creación de una serie de caudales teniendo en cuenta el cambio climático; utilizar una serie sintética de precipitación es la mejor manera de trabajar. Una serie sintética a partir de los parámetros estadísticos anteriormente descritos puede tener la longitud que nosotros decidamos que es suficiente, y si generamos una serie sintética muy larga tendremos una base muy sólida para hacer análisis de eventos extremos; ya que reproduce no solo los eventos normales que estarían en la media de la distribución; si no que también tendremos mucha información en la cola de esta.

Si decidiéramos trabajar con una serie corta (por ejemplo, 10 años); es probable que no se generen eventos muy extremos, como si lo hicieran de tener una serie de 500 años; ya que por golpe de números brutos las probabilidades de tener eventos extremos, aunque sean pequeñas; se acaban manifestando.

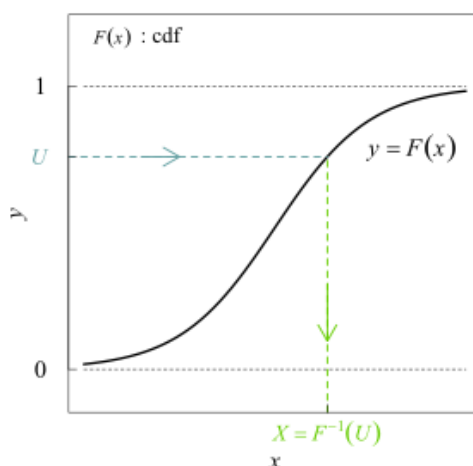
Podríamos trabajar únicamente con distribuciones estadísticas; haciendo innecesaria la creación de una serie sintética de precipitaciones; pero es necesario tener muy en cuenta cuál es el propósito último del estudio. Si a partir de estas distribuciones de precipitación (y también de la de temperatura como veremos posteriormente; que es mucho más sencilla), quisiéramos determinar la viabilidad de un cultivo, por ejemplo; podríamos trabajar de manera analítica en transformar la distribución de precipitación en humedad del suelo; para evaluar si dicho cultivo puede o no soportar las condiciones climáticas. Si la cuenca fuera muy sencilla, entonces también se podría trabajar en una manera de transformar la estadística referente a la precipitación en distribuciones de caudales en la cuenca.

En este caso, que la cuenca tiene ya una complejidad alta (10 subcuencas, con métodos para determinar comportamientos desde la percolación vertical hasta la tensión del suelo), la transformación de precipitación (y en menor medida temperatura) en un caudal a la salida de la cuenca es, simplemente; demasiado no lineal para intentar buscar una solución analítica. Es por ello que se necesita una serie de precipitaciones lo más completa posible.

7.2.1. Código sintetizador

Para llevar a cabo este trabajo, se confecciona un programa de Python que funciona de la siguiente manera:

1. Se declara una fecha inicial y el número de años a sintetizar.
2. Se inicia un bucle que corra tantas veces como años hemos deseado, teniendo en cuenta si nuestro año es bisiesto o no (HEC-HMS sí detecta años bisiestos, y hay que tener cuidado al generar series muy largas porque hay años que pueden parecer bisiestos pero que realidad no lo son, como el 2100).
3. Se anida otro bucle con una longitud igual al número de meses del año. Aquí, se leen los valores de λ y α correspondientes al dicho mes; a partir de las tablas anteriormente confeccionadas.
4. Dentro de este, se procede a sintetizar la precipitación. Primero, el proceso de Poisson establece si llueve o no en ese día, con el parámetro λ de ese mes. En caso de que llueva; se procede a dotar a esa precipitación a través del método de la transformada inversa (ilustrado su funcionamiento en la gráfica 33) a una función de distribución exponencial con el parámetro α . Dicho valor (0, o el valor de la lluvia) se guarda en una tabla junto con la fecha sintética que representa



Gráfica 33. Método de la transformada inversa

Dicho código corre sin problemas para series no demasiado largas (20 años). A la hora de crear una serie de 500 años se nota que le cuesta un poco, probablemente porque haga falta configurar bien la memoria que tiene disponible el programa y la tabla sintética. Es una implementación que merece la pena por su sencillez y en ocasiones futuras debe tenerse en cuenta.

7.2.2. Resultado de la serie sintética.

Se ha generado una serie de 20 años (2060-2079) y una serie de 500 años (2060-2559). La serie de 20 años será útil para hacer pruebas sin tener que usar mucho tiempo; pero la serie de caudales que nos importa verdaderamente es la de 500 años sintéticos. A esta serie, se le han añadido 3 años (2057-2059) copiando los valores de los años 2060-2062; con el único objetivo de servir como tiempo de calibración del modelo HMS. Estos años no se utilizan para evaluar los resultados al ser una simple copia. Aunque la serie de precipitaciones abarque 500 años, hay que tener en cuenta que está tratando el periodo comprendido entre 2060 y 2080.

Como es imposible plasmar 500 años en un papel, voy a plasmar los resultados de un año al azar (2400 por ejemplo) para poder apreciar por lo menos una parte del resultado (gráfica 34).



Gráfica 34. Serie de precipitaciones diarias, como ejemplo el año 2400

7.3. Tratamiento de la temperatura.

La temperatura es quizás el resultado de cambio climático con el que más familiarizado está la población general. Su afección a la vida general de la población fomenta esta percepción. Desde un punto de vista más amplio, este cambio (que generalmente tiende a un incremento) afecta al ciclo hidrológico, incrementando la evaporación directa del agua presente en superficie y suelo al tiempo que modifica el comportamiento de la cobertura vegetal y de los cultivos.

Como el modelo que hemos ejecutado en HMS utiliza el método de Hamon para evaluar la evapotranspiración en el modelo meteorológico, se puede tomar una licencia que haga el proceso de reasignación de la temperatura más simple. Es por ello que en lugar de sintetizar un valor de temperatura para cada día en la serie de 500 años, se utilizará una temperatura media mensual que ha de tener en cuenta el incremento de temperatura del cambio climático.

Si bien la sintetización de la serie de temperaturas es perfectamente factible, siendo modelable por ejemplo con una distribución normal con un par de parámetros para cada mes, debemos de tener en cuenta si esto tiene sentido en primer lugar. Considerando que existe una relación entre la precipitación producida en un día y el valor de temperatura media del mismo, es poco lógico intentar trabajar en un modelo sintético de temperatura, ya que puede ser que en un día de mucha lluvia la temperatura aleatoriamente generada fuera alta y viceversa. Básicamente lo que resultaría sería una serie de temperaturas que, en torno a un valor medio mensual se introduce una especie de “ruido” sin ton ni son.

Si se quisiera aplicar un criterio correcto a la sintetización de temperaturas, se debería desarrollar un análisis mucho más complejo que abarque tanto la parametrización de la precipitación y la temperatura, como con un estudio que analice la relación entre los dos valores; y finalmente se debería pensar en cómo introducir esto en un sintetizador diario para que los valores tuvieran coherencia.

Si bien esto puede ser muy interesante para estudios de sequía, cultivos o eco hidrología; a la hora de analizar episodios extremos de caudales en una cuenca, la temperatura pasa a un plano secundario, ya que en el tiempo de un evento de precipitación y caudal extremo la evapotranspiración no es uno de los factores que nos debiera preocupar. Además, a la hora de trabajar con los caudales para otro tipo de estudios, como podrían ser por ejemplo impactos ambientales, transportes y difusión de sedimentos; es de esperar que la media de temperaturas sea más que suficiente para extraer un caudal medio y otras conclusiones válidas.

7.3.1. Parametrización de la temperatura en la serie antigua

Para este apartado también se ha elaborado un código Python, similar al “lector” de la serie de precipitaciones. Se han utilizado los valores medios de temperatura de las estaciones en la zona de estudio. Para cada día de la serie se calcula el promedio de temperatura y, usando un código similar al del apartado de la precipitación, se calcula la suma de días con valores de temperatura válidos (no nulos) y se calcula la

suma de estos. Posteriormente se debe de calcular simplemente la temperatura media de cada mes a partir de estos valores. Esta práctica nos permite disminuir la importancia de los posibles errores que haya en los datos obtenidos de la AEMET. El resultado mensual es la tabla (28)

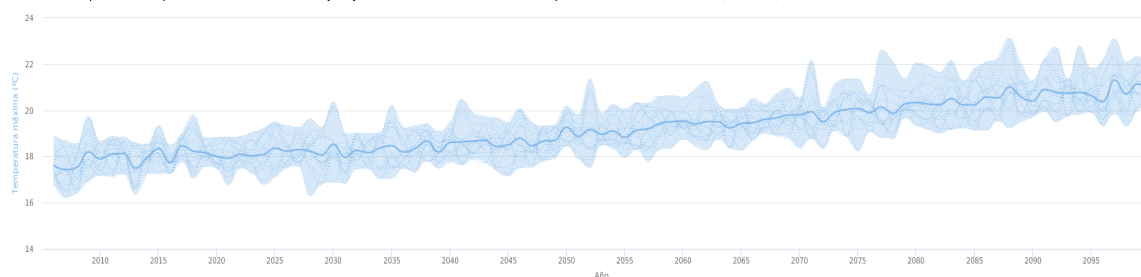
Mes	Temperatura media (°C)
1	7.0
2	8.2
3	9.4
4	10.7
5	13.6
6	16.4
7	18.8
8	19.0
9	17.6
10	14.4
11	10.4
12	8.2
Media anual	12.83

Tabla 28. Temperatura media mensual en la serie histórica.

7.3.2. Adaptación de la temperatura según el escenario RCP 8.5

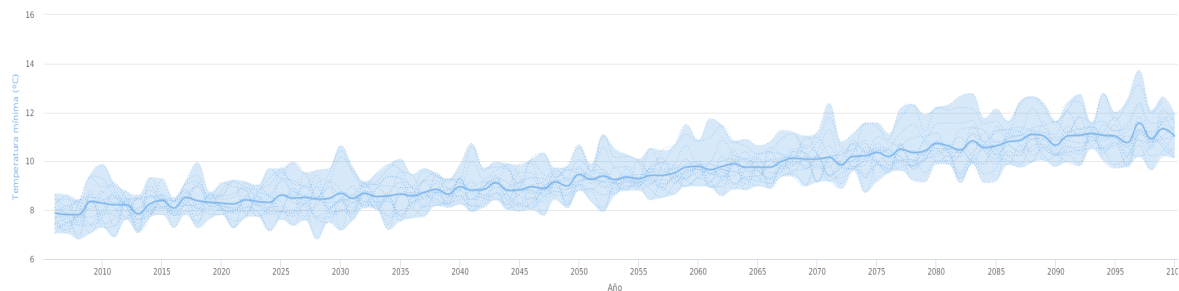
Usando la base de datos de ADAPTECCA, para la zona de estudio podemos extraer la información necesaria para evaluar la modificación de la temperatura media mensual que es el último dato necesario para poder llevar a cabo la simulación del modelo hidrológico. En esta base de datos recoge resultado de diversos modelos climáticos; por tanto, se considerará el valor medio de estos a la hora de tratar la evolución de la temperatura. En la tabla (29) se recogen los resultados de este análisis.

Escenarios AdapteCCA - Temperatura máxima - Datos en rejilla ajustados (media) - RCP 8.5 - Año completo - Los Corrales de Buelna (Cantabria)



Gráfica 35. Evolución de la temperatura máxima en el escenario RCP 8.5 según los distintos modelos climáticos que contempla AdapteCCA

Escenarios AdapteCCA - Temperatura mínima - Datos en rejilla ajustados (media) - RCP 8.5 - Año completo - Los Corrales de Buelna (Cantabria)



Gráfica 36. Ídem que la 35, pero con la temperatura mínima.

Temperatura RCP 8.5 (°C)									
Año	Tmin			Tmed			Tmax		
	Modelo mínimo	Modelo medio	Modelo máximo	Modelo mínimo	Modelo medio	Modelo máximo	Modelo mínimo	Modelo medio	Modelo máximo
2060	9.0	9.8	10.9	13.9	14.7	15.7	18.7	19.5	20.6
2061	8.9	9.7	11.7	13.7	14.5	16.3	18.5	19.4	20.9
2062	8.6	9.8	11.5	13.4	14.6	16.4	18.3	19.5	21.2
2063	8.9	9.9	10.8	13.8	14.7	15.6	18.7	19.5	20.3
2064	8.8	9.7	10.9	13.6	14.5	15.5	18.4	19.2	20.1
2065	9.0	9.8	10.6	13.6	14.6	15.4	18.3	19.4	20.1
2066	8.9	9.8	10.8	13.8	14.6	15.6	18.7	19.5	20.5
2067	9.4	10.0	11.3	14.2	14.8	15.8	19.0	19.6	20.3
2068	9.4	10.1	11.2	14.1	14.9	15.9	18.9	19.7	20.7
2069	9.0	10.1	11.0	13.9	14.9	16.0	18.8	19.8	21.0
2070	9.2	10.1	11.2	13.8	15.0	15.9	18.4	19.8	20.5
2071	9.2	10.2	12.4	14.0	15.0	17.3	18.8	19.9	22.2
2072	8.9	9.9	10.8	13.6	14.7	15.5	18.3	19.5	20.1
2073	9.6	10.2	11.1	14.4	15.1	16.1	19.1	19.9	21.1
2074	8.7	10.2	11.6	13.8	15.1	16.5	18.9	20.0	21.4
2075	9.2	10.4	11.6	13.7	15.2	16.5	18.2	20.1	21.4
2076	9.5	10.2	11.1	14.3	15.0	15.9	19.0	19.9	20.7
2077	9.6	10.5	12.2	14.2	15.3	17.4	18.8	20.1	22.6
2078	9.2	10.4	12.3	14.0	15.1	17.2	18.8	19.9	22.1
2079	9.2	10.4	11.9	14.4	15.4	16.6	19.7	20.3	21.4
2080	9.9	10.7	12.2	14.6	15.5	17.1	19.3	20.3	22.1
Valor medio	9.1	10.1	11.4	13.9	14.9	16.2	18.7	19.8	21.0

Tabla 29. Recopilación de los valores de temperatura media anual que proyecta AdapteCCA.

La temperatura media anual se incrementa en un valor de 2.07°C al calcular la variación desde la serie de 1971-1993 a la serie proyectada de 2060-2080. Si trabajamos en kelvin, la diferencia nos dice que debemos incrementar la serie antigua por un factor del 0.73%. Este cambio se efectúa en la tabla (30)

Mes	Temperatura serie futura (°C)	Incremento absoluto (°C)
1	9.0	2.048
2	10.3	2.057
3	11.5	2.066
4	12.8	2.075
5	15.7	2.096
6	18.5	2.117
7	20.9	2.134
8	21.1	2.135
9	19.7	2.125
10	16.5	2.102
11	12.5	2.073
12	10.2	2.057

Tabla 30. Variación de la temperatura media mensual.

Los valores resultantes de la precipitación se adhieren a la tabla de precipitaciones según sea el mes correspondiente, de tal manera que en una única tabla quedan definidos todos los valores necesarios para el modelo meteorológico de HMS.

8. RESULTADO

Al introducir toda la información anterior en HMS, solo es necesario definir el periodo de simulación, que será entre 2057 hasta 2559. Hay que recordar que los tres primeros años no valen como resultado, ya que son un simple calentamiento del modelo hidrológico, por lo que la verdadera simulación abarca desde 2060 hasta 2559, 500 años justos. Al ser una serie muy larga, hay que tener bastante paciencia a la hora de esperar el resultado. Con una resolución diaria en una noche más o menos se obtiene el resultado final, que es la tabla de caudales.

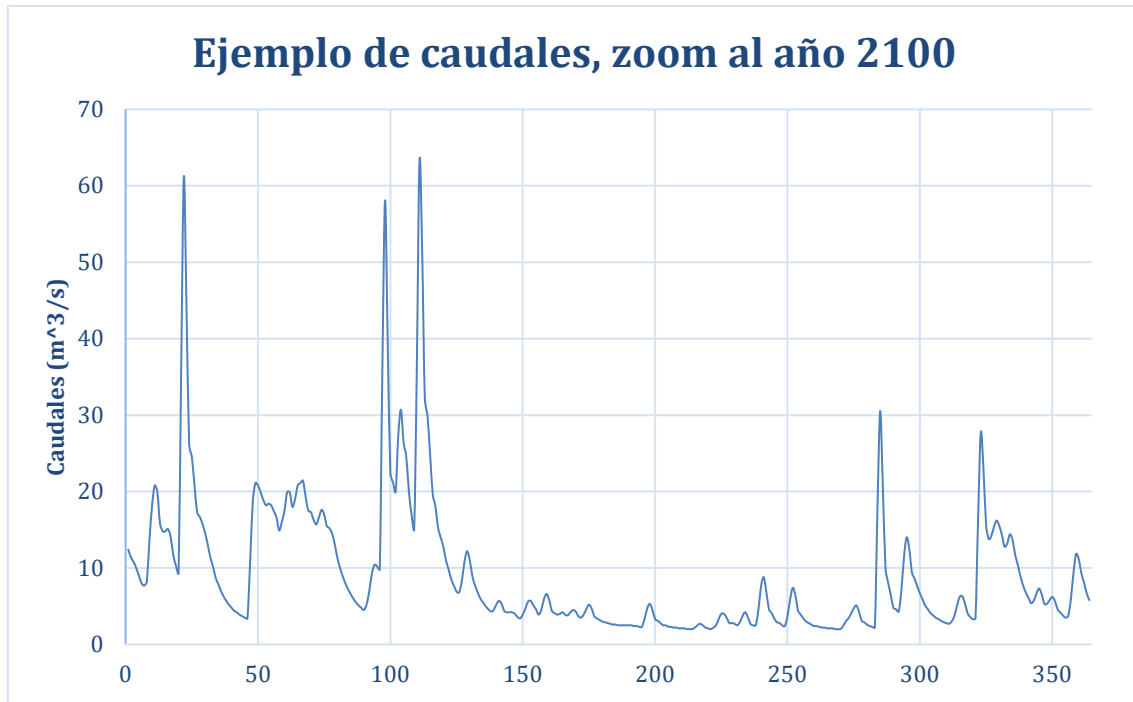
Ante la imposibilidad espacial de colocar una gráfica de 500 años de valores (182621 valores en total) en el documento, se van a seleccionar algunos años de ejemplo (gráficas 37, 38 y 39) para poder hacer una representación aproximada del resultado.

A modo de conclusión, este procedimiento de generación sintética supone un avance con respecto a una metodología básica. Si bien se han comentado unas limitaciones, es importante destacar que en un principio una mejora en la metodología es posible, y que se puede complicar a gusto del analista. Como resultado final, realmente este estudio tiene como objetivo la generación de una serie de caudales. Se puede dar una cifra sobre el decremento del caudal medio del río, que es de un 19% según la tabla 31. El caudal en la serie histórica roza los 12.2 metros cúbicos por segundo, pero decrece hasta los 9.9.

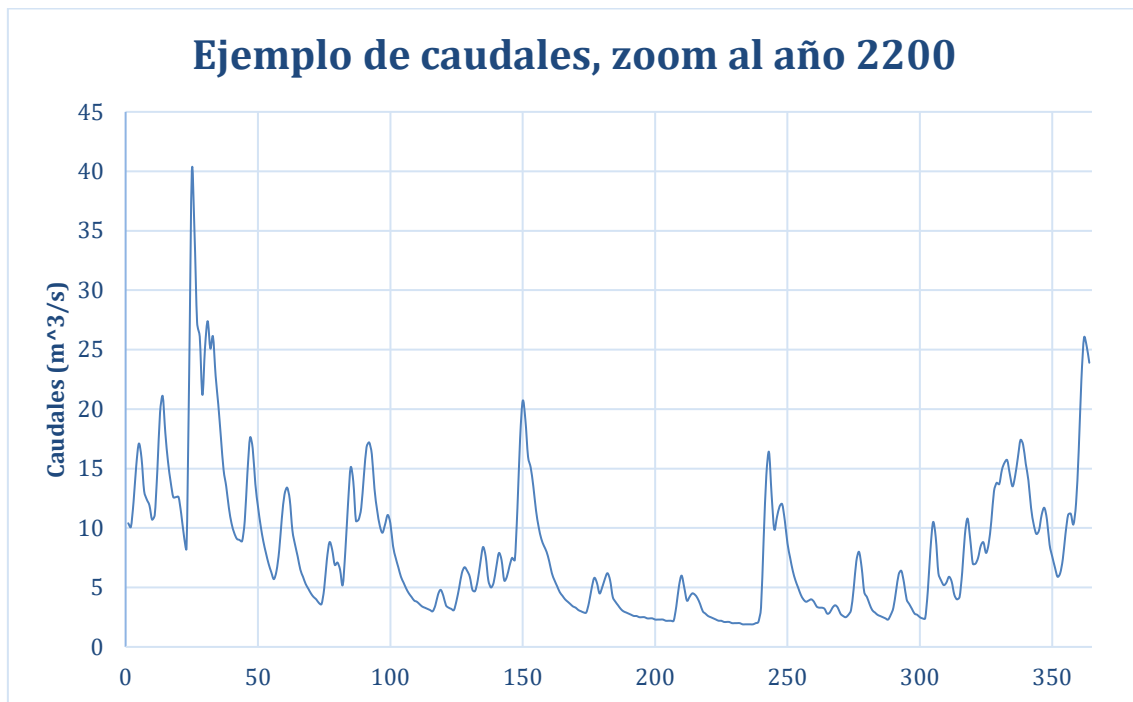
Seguramente estos valores sean de un gran interés a la hora de hacer estudios sobre el impacto del cambio climático en el medio acuático del río Besaya, o sobre cómo puede afectar a la producción agrícola en los meses de verano. En este caso, el resultado se enfoca a un estudio posterior sobre el análisis de riesgo de inundación de este río en Los Corrales de Buelna (Miranda, 2020), para lo que el régimen medio no es tan importante como la serie de caudales en sí misma.

Mes	Caudal medio (m ³ /s)
1	13.59
2	13.01
3	12.78
4	15.62
5	11.69
6	6.82
7	3.74
8	3.89
9	3.85
10	8.55
11	12.97
12	12.24
Media	9.9
Variación	-19%

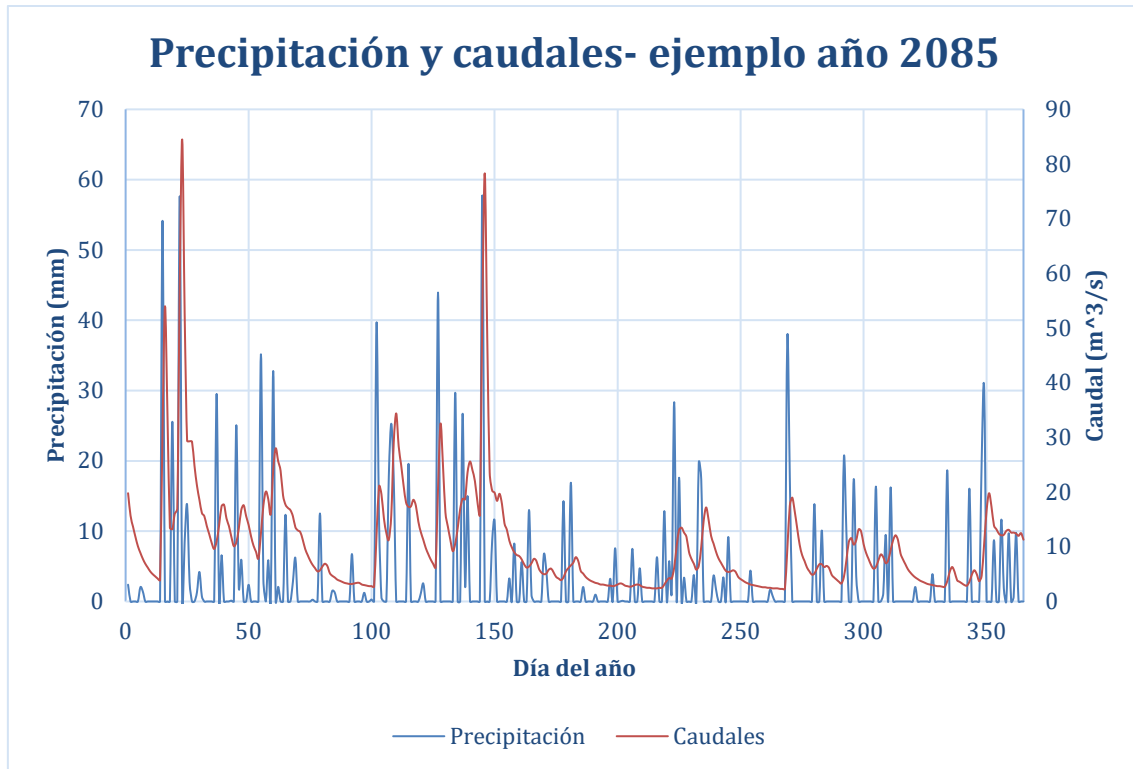
Tabla 31. Caudales medios mensuales, y medio anual (rojo). Se compara con el caudal medio anual actual, estimado en unos 12.2 metros cúbicos por segundo.



Gráfica 37. Gráfica de ejemplo del resultado de la simulación de caudales bajo las condiciones de cambio climático en el escenario RCP 8.5 para los años 2060-2080.



Gráfica 38. Gráfica de ejemplo del resultado de la simulación de caudales bajo las condiciones de cambio climático en el escenario RCP 8.5 para los años 2060-2080.



Gráfica 39. Serie sintética de caudales (rojo), con la escala a la derecha, generada a partir de la serie sintética de precipitaciones (azul), con la escala a la izquierda. Considera el cambio climático en los años 2060-2080 con el escenario RCP 8.5

Bibliografía

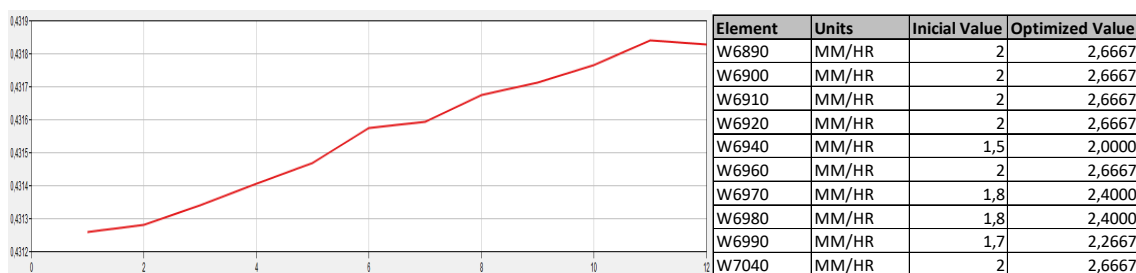
- Blanco, E. I. (2016). *Tutorial Modelamiento Hidrológico Geoespacial Usando HEC-GeoHMS*.
- Brigitta Tóth, M. W. (2017). *3D Soil Hydraulic Database of Europe at 1 km and 250 m resolution*. Obtenido de <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/3d-soil-hydraulic-database-europe-1-km-and-250-m-resolution>
- Cabrera, J. (s.f.). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Cedex. (s.f.). *Demarcaciones Hidrográficas*. Obtenido de <http://hisagua.cedex.es/?q=instituciones/demarcaciones>
- Centro Nacional de Información Geográfica. (s.f.). *Centro Nacional de Información Geográfica*. Obtenido de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=LID A2>
- CHC. Confederación hidrográfica del Cantabrico. (s.f.). *Río Besaya*. Obtenido de <https://www.chcantabrico.es/las-cuencas-cantabricas/marco-fisico/hidrologia/rios/besaya?redirect=%2Forganismo%2Fflas-cuencas-cantabricas%2Fmarco-fisico%2Fhidrologia%2Frios%2Fdhc-occidental>
- Confederación hidrográfica del Cantábrico. (s.f.). *Perfil Longitudinal Río Besaya*. Obtenido de <https://www.chcantabrico.es/las-cuencas-cantabricas/marco-fisico/hidrologia/rios/besaya>
- Cordex. (s.f.). *About Regional Downscaling*. Obtenido de <https://cordex.org/about/what-is-regional-downscaling/>
- Equipo Técnico Nacional SIOSE, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2018). *Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España. Documento técnico SIOSE 2014*. Obtenido de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=SIOS E>
- Euro-Cordex. (s.f.). *EURO-CORDEX*. Obtenido de www.euro-cordex.net
- F.Laio, A. P.-I. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress II. Probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in Water Resources*, 707-723.
- Iagua. (s.f.). *Iagua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/data/infraestructuras/embalses/mediajo>
- International Institute for Applied Systems Analysis. (s.f.). *RCP Database*. Obtenido de <https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=welcome>
- Miranda, A. M. (2020). *Trabajo de fin de grado. Análisis del riesgo de inundación futura en Los Corrales de Buelna*. Santander: Universidad de Cantabria.
- MITECO, Ministerio para la Transición Ecológica. (s.f.). *Adaptecca*. Obtenido de <https://www.adaptecca.es/>
- Molner, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling*. Zurich: ETH Zurich.
- NOAA. (Mayo de 2020). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Obtenido de <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Ramirez, J. A. (s.f.). *Muskingum Routing - Example*. Fort Collins: University of Colorado State.
- Richard G. Allen, L. S. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Roma: FAO.

- Román, F. J. (2015). *HEC-HMS. Manual Elemental*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Román, F. J. (s.f.). *Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Román, F. J. (s.f.). *Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación - Escorrentía*. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Samani, G. H. (1985). *Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature*. Chicago, Illinois: American Society of Agricultural Engineers.
- Scipy. (s.f.). *Scipy*. Obtenido de <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.expon.html>
- Universidad de Cantabria. (s.f.). *La energía en Cantabria en un marco globalizado*. Santander: Unican.
- US Army Corp of Engineers. (2016). *Hydologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual*. US Army.
- US Army Corps of Engineers. (2013). *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrological Modeling Extension: User's Manual*.

A- PROCESO DE CALIBRACIÓN

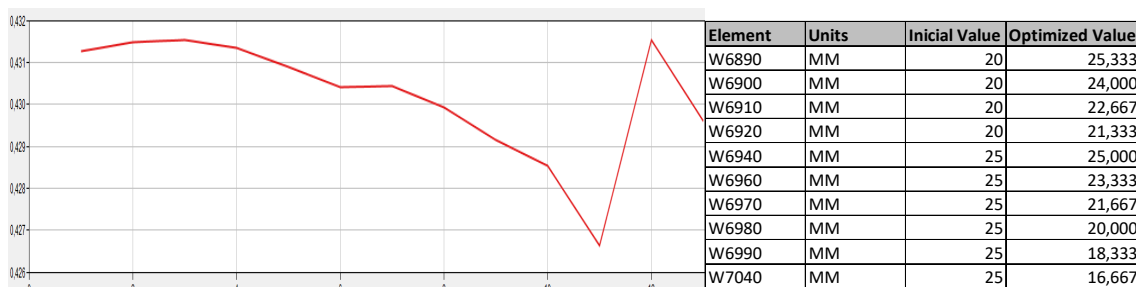
Se añaden los resultados del proceso de calibración automática, que son muy interesantes para comprender aspectos de sensibilidad del modelo a ciertos parámetros. El orden seguido es el cronológico, de modo que los últimos valores son los más próximos al resultado final de la calibración. En las gráficas se compara el número de iteraciones (eje horizontal) frente al coeficiente de Nash Suttcliffe NSE (eje vertical). A mayor NSE mejor se considera que el modelo HMS se ajusta a los datos observados en la estación de aforo.

Soil Moisture Accounting – GW1 Percolation



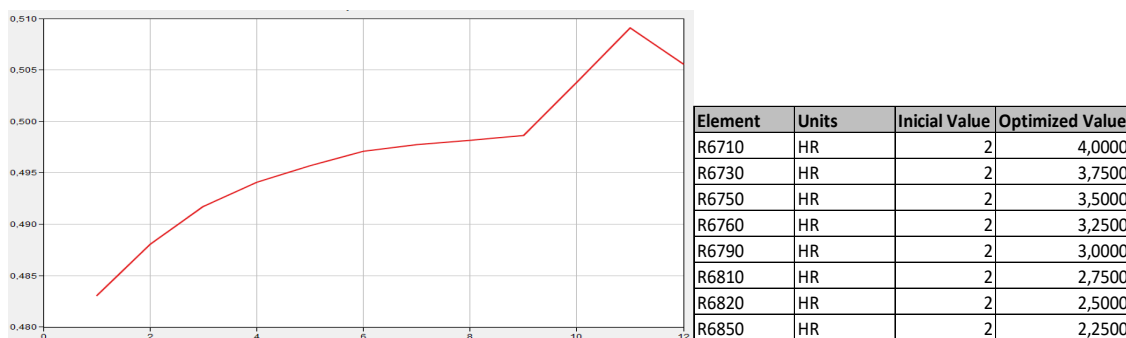
Gráfica 40 y Tabla 32.

Soil Moisture Accounting – GW1 Storage



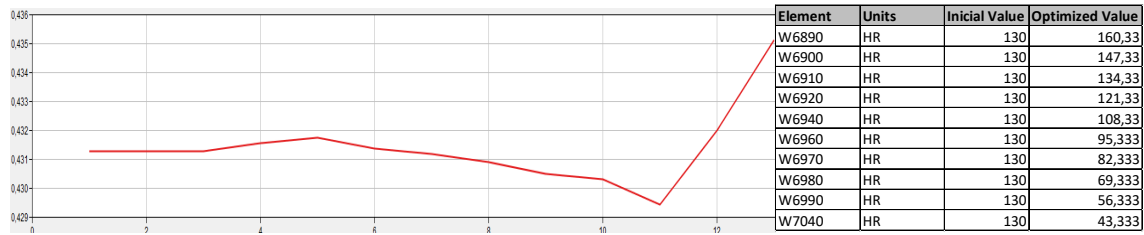
Gráfica 41 y Tabla 33.

Muskingum – K



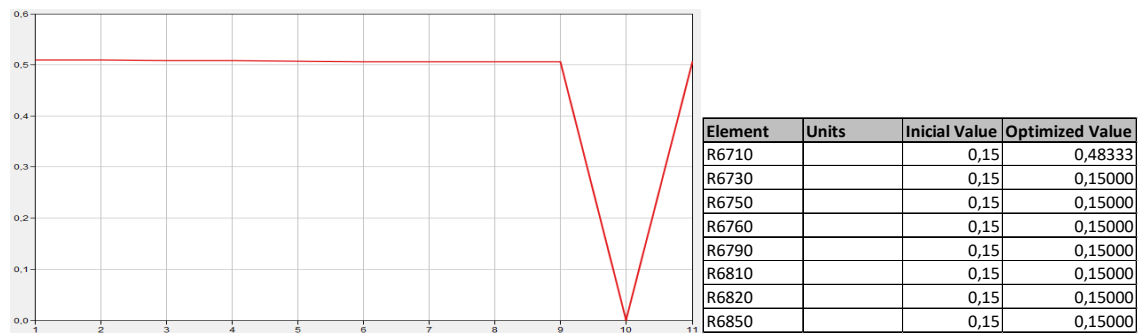
Gráfica 42 y Tabla 34.

Soil Moisture Accounting – GW1 Storage coefficient



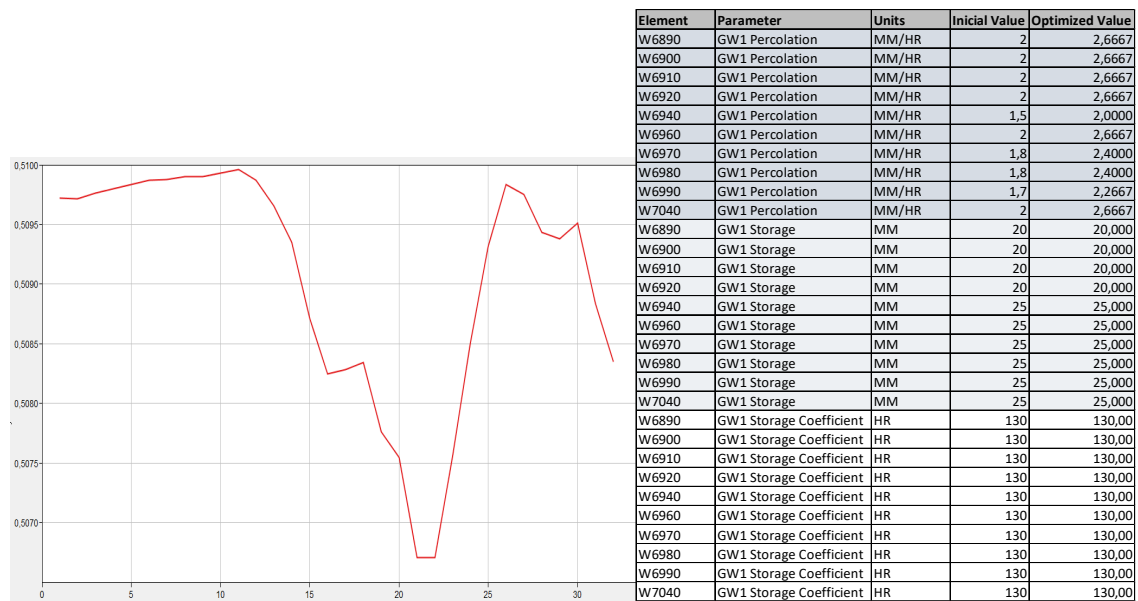
Gráfica 43 y Tabla 35.

Muskingum X



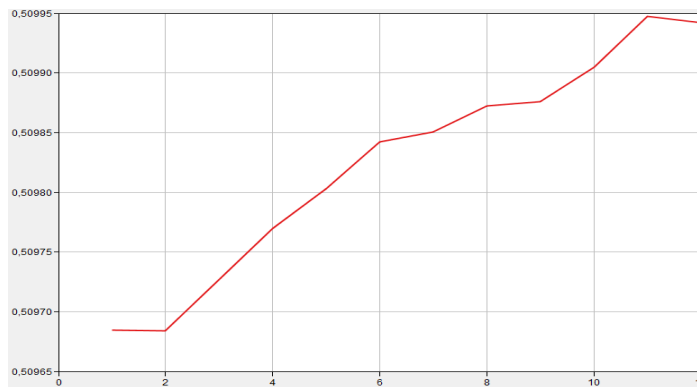
Gráfica 44 y Tabla 36.

Soil Moisture Accounting – GW1 todos los parámetros a la vez



Gráfica 45 y Tabla 37.

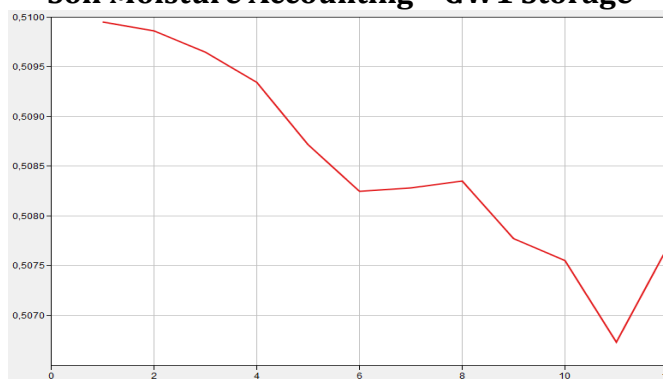
Soil Moisture Accounting – GW1 Percolation



Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM/HR	2	2,6667
W6900	MM/HR	2	2,6667
W6910	MM/HR	2	2,6667
W6920	MM/HR	2	2,6667
W6940	MM/HR	1,5	2,0000
W6960	MM/HR	2	2,6667
W6970	MM/HR	1,8	2,4000
W6980	MM/HR	1,8	2,4000
W6990	MM/HR	1,7	2,2667
W7040	MM/HR	2	2,6667

Gráfica 46 y Tabla 38.

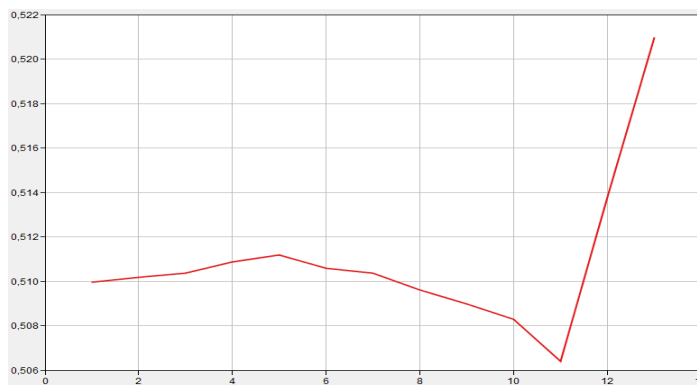
Soil Moisture Accounting – GW1 Storage



Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM	20	20,000
W6900	MM	20	20,000
W6910	MM	20	20,000
W6920	MM	20	20,000
W6940	MM	25	25,000
W6960	MM	25	25,000
W6970	MM	25	25,000
W6980	MM	25	25,000
W6990	MM	25	25,000
W7040	MM	25	25,000

Gráfica 47 y Tabla 39.

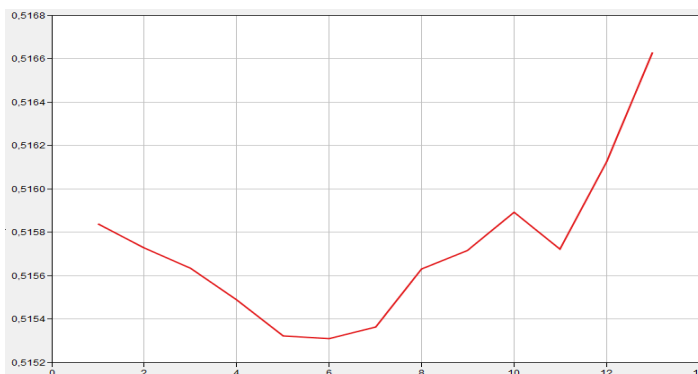
Soil Moisture Accounting – GW1 Storage Coefficient



Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	HR	130	160,33
W6900	HR	130	147,33
W6910	HR	130	134,33
W6920	HR	130	121,33
W6940	HR	130	108,33
W6960	HR	130	95,333
W6970	HR	130	82,333
W6980	HR	130	69,333
W6990	HR	130	56,333
W7040	HR	130	43,333

Gráfica 48 y Tabla 40.

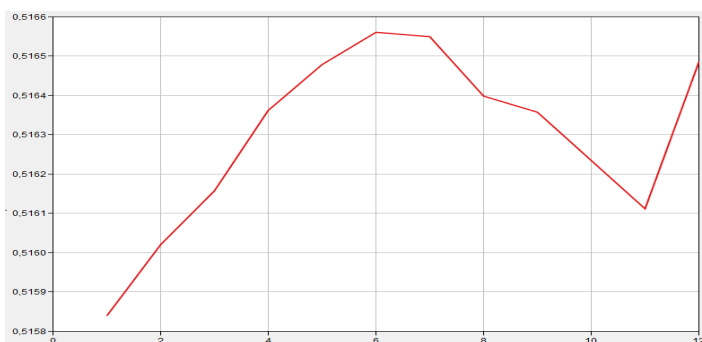
Soil Moisture Accounting – GW2 Storage



Gráfica 49 y Tabla 41.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM	40	49,333
W6900	MM	40	45,333
W6910	MM	40	41,333
W6920	MM	40	37,333
W6940	MM	45	37,500
W6960	MM	45	60,000
W6970	MM	45	63,000
W6980	MM	45	58,500
W6990	MM	45	54,000
W7040	MM	45	49,500

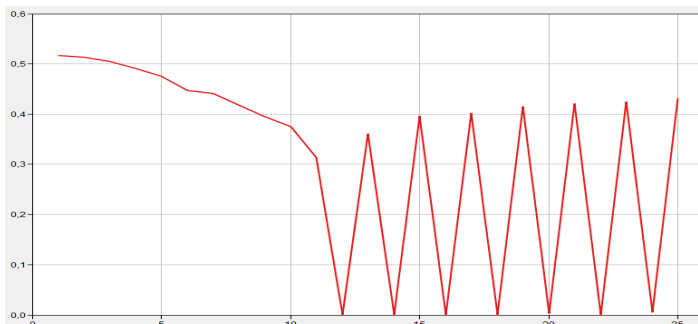
Soil Moisture Accounting – GW2 Storage Coefficient



Gráfica 50 y Tabla 42.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	HR	1200	1600,0
W6900	HR	1200	1600,0
W6910	HR	1200	1600,0
W6920	HR	1200	1600,0
W6940	HR	1200	1600,0
W6960	HR	1200	1200,0
W6970	HR	1200	1200,0
W6980	HR	1200	1200,0
W6990	HR	1200	1200,0
W7040	HR	1200	1200,0

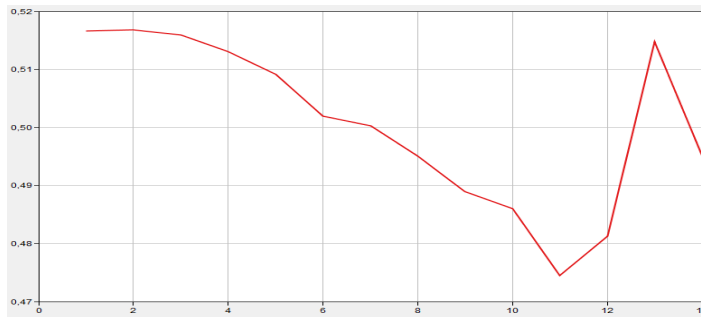
Soil Moisture Accounting – GW2 Percolation



Gráfica 51 y Tabla 43.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM/HR	0,035	0,0350000
W6900	MM/HR	0,035	0,0350000
W6910	MM/HR	0,035	0,0350000
W6920	MM/HR	0,035	0,0350000
W6940	MM/HR	0,035	0,0350000
W6960	MM/HR	0,035	0,0350000
W6970	MM/HR	0,035	0,0350000
W6980	MM/HR	0,035	0,0350000
W6990	MM/HR	0,035	0,0350000
W7040	MM/HR	0,035	0,0350000

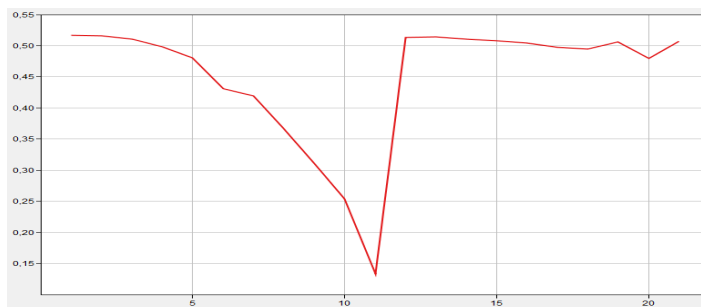
Soil Moisture Accounting – Soil storage



Gráfica 52 y Tabla 44.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM	104,6	139,47
W6900	MM	104,5	104,50
W6910	MM	105,9	105,90
W6920	MM	105,2	105,20
W6940	MM	102,5	102,50
W6960	MM	99,9	99,900
W6970	MM	102,4	102,40
W6980	MM	103	103,00
W6990	MM	104,9	104,90
W7040	MM	103,6	103,60

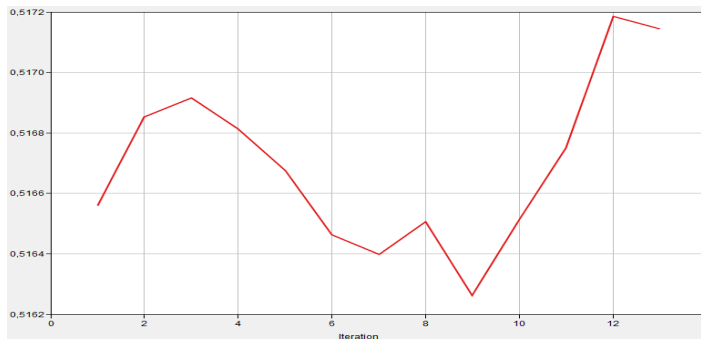
Soil Moisture Accounting – Tension Storage



Gráfica 53 y Tabla 45.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM	80	80,000
W6900	MM	80	80,000
W6910	MM	80	80,000
W6920	MM	80	80,000
W6940	MM	80	80,000
W6960	MM	80	80,000
W6970	MM	80	80,000
W6980	MM	80	80,000
W6990	MM	80	80,000
W7040	MM	80	80,000

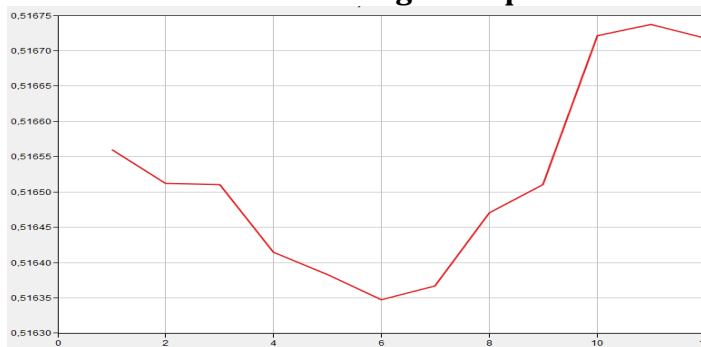
Soil Moisture Accounting – Max infiltration



Gráfica 54 y Tabla 46.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM/HR	4	5,0667
W6900	MM/HR	5	6,0000
W6910	MM/HR	5	5,6667
W6920	MM/HR	5	5,3333
W6940	MM/HR	5,5	5,5000
W6960	MM/HR	6	5,6000
W6970	MM/HR	5,5	4,7667
W6980	MM/HR	5	4,0000
W6990	MM/HR	6	6,8000
W7040	MM/HR	7	7,4667

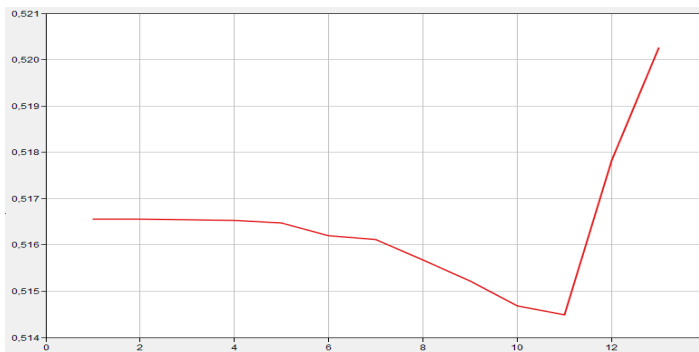
Soil Moisture Accounting – Soil percolation



Gráfica 55 y Tabla 47.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM/HR	4,9	6,5333
W6900	MM/HR	4,9	6,5333
W6910	MM/HR	4,9	6,5333
W6920	MM/HR	4,9	6,5333
W6940	MM/HR	4,9	6,5333
W6960	MM/HR	2,1	2,8000
W6970	MM/HR	4	5,3333
W6980	MM/HR	3,7	4,9333
W6990	MM/HR	4	5,3333
W7040	MM/HR	5	6,6667

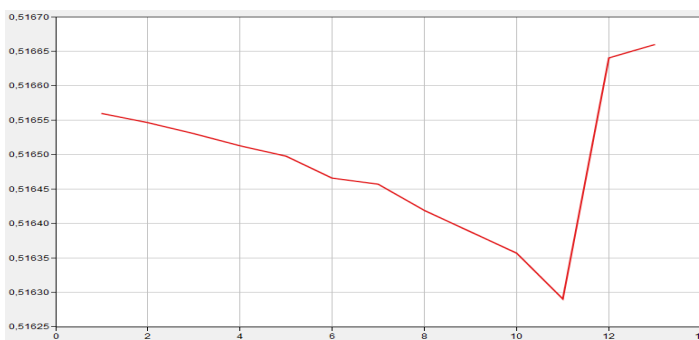
Linear Reservoir – GW1 Coefficient (1)



Gráfica 56 y Tabla 48.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	HR	130	160,33
W6900	HR	130	147,33
W6910	HR	130	134,33
W6920	HR	130	121,33
W6940	HR	130	108,33
W6960	HR	130	95,333
W6970	HR	130	82,333
W6980	HR	130	69,333
W6990	HR	130	56,333
W7040	HR	130	43,333

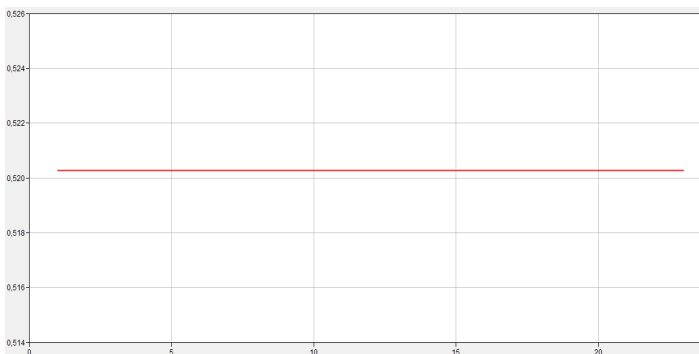
Linear Reservoir – GW2 Coefficient (2)



Gráfica 57 y Tabla 49.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	HR	1200	1480,0
W6900	HR	1200	1360,0
W6910	HR	1200	1240,0
W6920	HR	1200	1120,0
W6940	HR	1200	1000,00
W6960	HR	1200	880,00
W6970	HR	1200	760,00
W6980	HR	1200	640,00
W6990	HR	1200	520,00
W7040	HR	1200	400,00

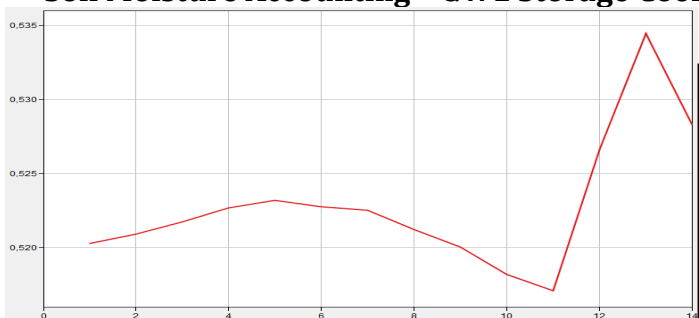
SCS Unit Hydrograph – Lag Time



Gráfica 58 y Tabla 50.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MIN	123,3592103	123,36
W6900	MIN	140,8825741	140,88
W6910	MIN	153,4222642	153,42
W6920	MIN	171,432579	171,43
W6940	MIN	132,4243603	132,42
W6960	MIN	166,0054389	166,01
W6970	MIN	178,9650137	178,97
W6980	MIN	158,956641	158,96
W6990	MIN	181,2031194	181,20
W7040	MIN	196,6942306	196,69

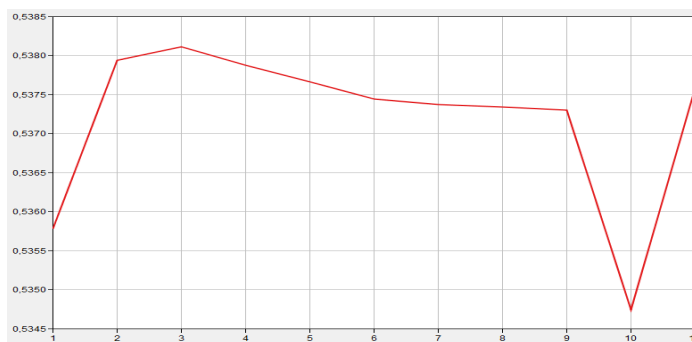
Soil Moisture Accounting – GW1 Storage Coefficient



Gráfica 59 y Tabla 51.

Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	HR	160,33	197,74
W6900	HR	147,33	166,97
W6910	HR	134,33	138,81
W6920	HR	121,33	113,24
W6940	HR	108,33	90,275
W6960	HR	95,333	69,911
W6970	HR	82,333	52,144
W6980	HR	69,333	36,978
W6990	HR	56,333	24,411
W7040	HR	130,00	43,333

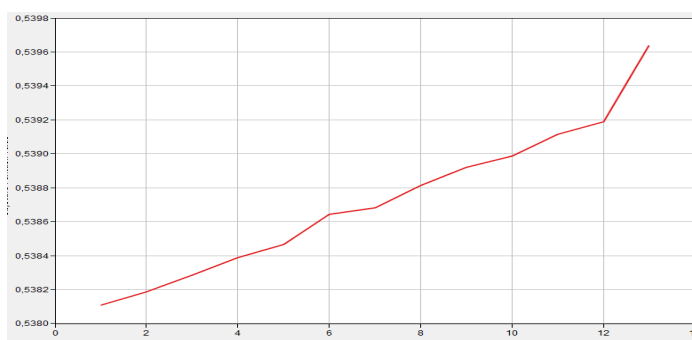
Muskingum - K



Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
R6710	HR	4,00	5,33
R6730	HR	3,75	5,00
R6750	HR	3,50	3,50
R6760	HR	3,25	3,25
R6790	HR	3,00	3,00
R6810	HR	2,75	2,75
R6820	HR	2,50	2,50
R6850	HR	2,25	2,25

Gráfica 60 y Tabla 52.

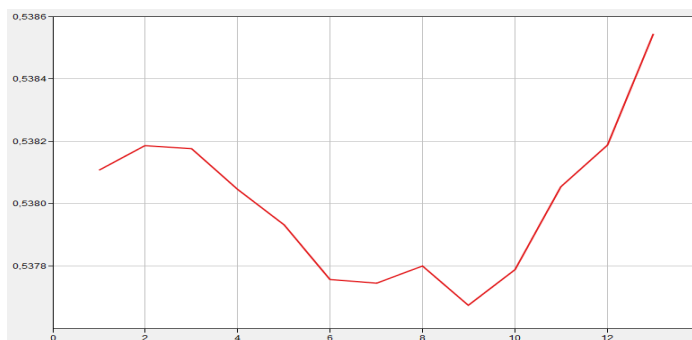
Simple Canopy - Max Storage



Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM	5	10,000
W6900	MM	5	9,5000
W6910	MM	5	9,0000
W6920	MM	5	8,5000
W6940	MM	5	8,0000
W6960	MM	5	7,5000
W6970	MM	5	7,0000
W6980	MM	5	6,5000
W6990	MM	5	6,0000
W7040	MM	5	5,5000

Gráfica 61 y Tabla 53.

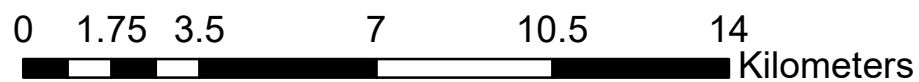
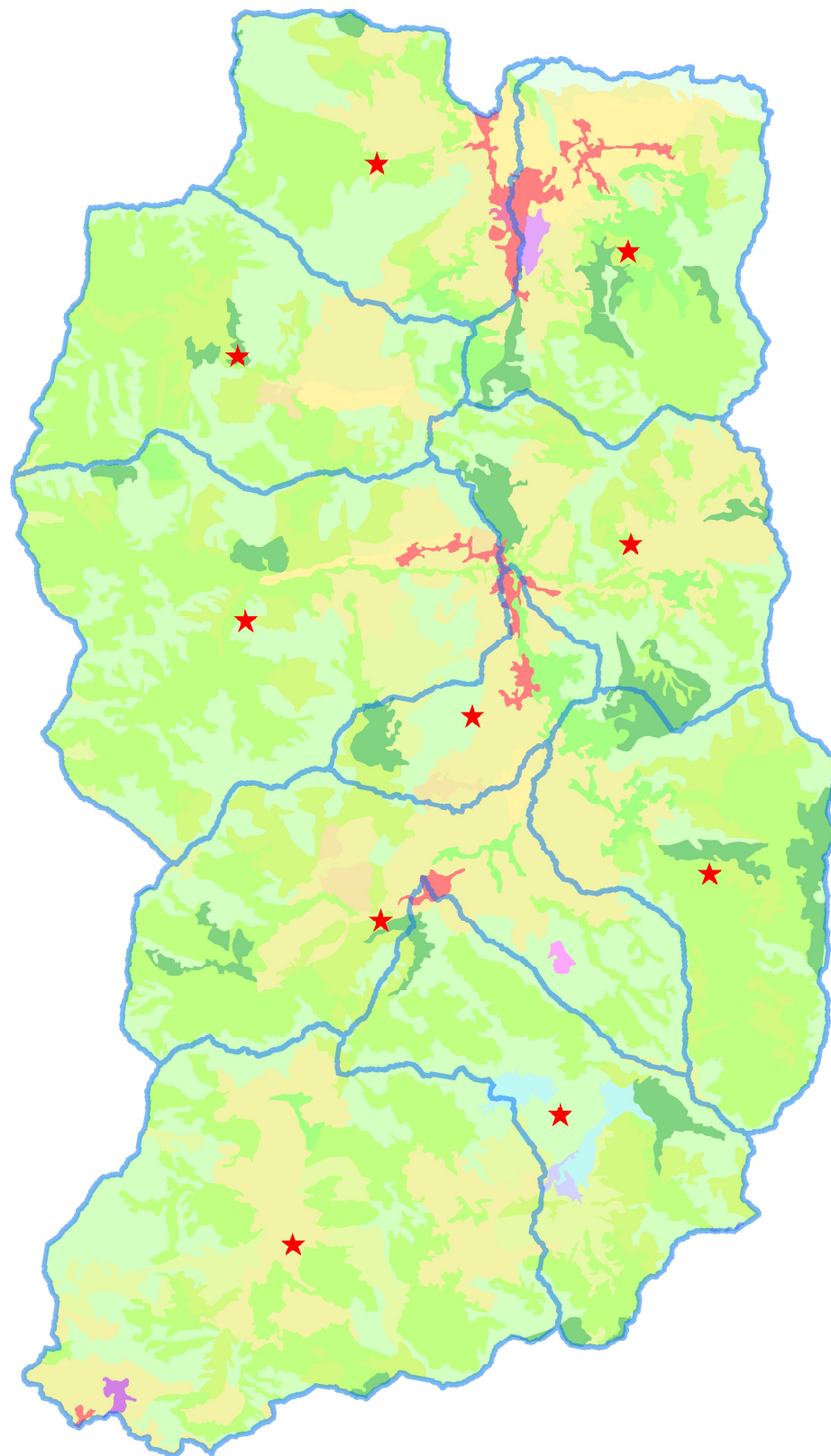
Simple Surface - Max Storage



Element	Units	Inicial Value	Optimized Value
W6890	MM	5	6,1667
W6900	MM	5	5,6667
W6910	MM	5	5,1667
W6920	MM	5	4,6667
W6940	MM	5	4,1667
W6960	MM	5	3,6667
W6970	MM	5	3,1667
W6980	MM	5	2,6667
W6990	MM	5	6,0000
W7040	MM	5	5,5000


Gráfica 62 y Tabla 54.

B- Mapa de uso de suelos CORINE LAND COVER



1:150,000

Leyenda:

 Subcuencas

 Centroides

CORINE Land Cover Use

CLC Code

-  111: Continuous urban fabric
-  112: Discontinuous urban fabric
-  121: Industrial or commercial units
-  122: Road and rail networks and associated land
-  123: Port areas
-  124: Airports
-  131: Mineral extraction sites
-  132: Dump sites
-  133: Construction sites
-  141: Green urban areas
-  142: Sport and leisure facilities
-  211: Non-irrigated arable land
-  212: Permanently irrigated land
-  213: Rice fields
-  221: Vineyards
-  222: Fruit trees and berry plantations
-  223: Olive groves
-  231: Pastures
-  241: Annual crops associated with permanent crops
-  242: Complex cultivation patterns
-  243: Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation
-  244: Agro-forestry areas
-  311: Broad-leaved forest
-  312: Coniferous forest
-  313: Mixed forest
-  321: Natural grasslands
-  322: Moors and heathland
-  323: Sclerophyllous vegetation
-  324: Transitional woodland-shrub
-  331: Beaches, dunes, sands
-  332: Bare rocks
-  333: Sparsely vegetated areas
-  334: Burnt areas
-  335: Glaciers and perpetual snow
-  411: Inland marshes
-  412: Peat bogs
-  421: Salt marshes
-  422: Salines
-  423: Intertidal flats
-  511: Water courses
-  512: Water bodies
-  521: Coastal lagoons
-  522: Estuaries
-  523: Sea and ocean